

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

ED 352 : PHYSIQUE ET SCIENCES DE LA MATIERE

FACULTE SAINT JEROME

INSTITUT FRESNEL (UMR 7249)

MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Physique

Spécialité : Traitement du Signal

Julien MAROT

Méthodes déterministes et méta-heuristiques d'estimation de paramètres pour le traitement des images multidimensionnelles

Synthèse des travaux de recherche en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches

Soutenue le 02/07/2019 devant le jury composé de :

Pascal Larzabal	PR, SATIE ENS Cachan	Rapporteur
Eric Moreau	PR, LIS Toulon	Rapporteur
Yide Wang	PR, IETR Nantes	Rapporteur
Régine Le Bouquin Jeannès	PR, LTSI Rennes	Présidente
Claire Migliaccio	PR, LEAT Nice	Examineur
Camel Tanougast	PR, LCOMS Nancy	Examineur
Jacques Blanc-Talon	Dr, DGA Paris	Invité
Salah Bourennane	PR, Institut Fresnel Marseille	Tuteur



Cette oeuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Résumé

Mots clés : Image, Optimisation bio-inspirée, Multispectral

Ce document présente un aperçu des travaux de recherche menés pendant une dizaine d'années dans le domaine du traitement des images. En tant que Maître de Conférences, une grande partie de mon temps est consacrée à l'enseignement, et j'ai tenu à évoquer brièvement cette activité. Mes travaux de thèse y sont également résumés, car ils servent de socle aux travaux que j'ai menés immédiatement après en encadrant deux doctorants. Ils portaient principalement sur la caractérisation de contours par des méthodes de transformation d'images et des algorithmes déterministes d'optimisation. Après des activités applicatives à l'Institut Fraunhofer IIS mes travaux ont été menés principalement en collaboration avec des doctorants. Chaque sujet abordé dans ce document est étayé par une application en relation avec un partenaire industriel ou académique. Dans le prolongement direct de ma thèse, nous avons caractérisé des contours flous et étoilés distordus, par des méthodes d'optimisation déterministes. La caractérisation de contours est illustrée par une application de détection de défauts dans des surfaces métalliques soumise par l'Institut Fraunhofer IIS. Nous avons ensuite, avec deux doctorants différents, travaillé avec l'entreprise IntuiSense Technologies, dans le cadre de systèmes de vision par ordinateur, soit pour faire de la classification de posture de la main, soit pour estimer la position de visages dans une scène. Dans le second cas les aspects embarqués ont été pris en compte en tant que contrainte forte de travail. L'estimation de paramètres par des méthodes méta-heuristiques bio-inspirées a progressivement pris de la place dans mes activités. Nous avons commencé par adapter une méthode inspirée du comportement des oiseaux appelée 'optimisation par essaim de particules' pour l'estimation de rangs utilisés pour débruiter une image multi-spectrale, dans le paradigme de la transformée en paquets d'ondelettes. Un montage a été réalisé à l'Institut Fraunhofer IIS, et deux collaborations académiques nous ont conduits à une application en imagerie en fluorescence et à une application en imagerie RX multispectrale. Puis, le domaine des mathématiques appliquées que constitue la méta-heuristique étant en plein essor, nous nous sommes investis dans la création d'une méthode innovante d'optimisation bio-inspirée, capable d'estimer des valeurs de paramètres de façon conjointe dans des espaces de recherche à la fois discrets et continus. Nous avons appelé cette nouvelle méthode d'optimisation bio-inspirée la méthode du loup gris mixte, car elle s'inspire du comportement d'une meute de loups. Nous avons appliqué notre méthode au débruitage et dé-mélange conjoint d'images multi-spectrales.

Abstract

Keywords: Image, Bio-inspired Optimization, Multispectral

This document summarizes a 10-year period of research handled in the domain of image processing. As an assistant professor, teaching is an important part of my activities and I evoke it briefly. My PhD is also summarized because it has been used as a basis for works performed with two PhD students. It dealt mainly with contour characterization with image transform methods and deterministic optimization algorithms. After some applicative activities in Fraunhofer Institute IIS, my work has been mainly performed through the supervision of PhD students. Each topic considered in this document is illustrated with an application proposed by an industrial or academic partner. With a methodology inspired by my Thesis, we have characterized blurred and star-shaped contours with deterministic optimization methods. Contour characterization is illustrated through a non-destructive defect detection application proposed by the Fraunhofer Institute IIS. We have then, with two different PhD students, collaborated with the firm IntuiSense Technologies in the frame of computer vision systems, for the purpose of either hand posture classification, or face detection and tracking. In the second case, a strong constraint concerning the hardware was taken into account. The estimation of parameters with meta-heuristic bio-inspired optimization methods has also become, progressively, a time-consuming activity. We have started with the adaptation of a method inspired by the behavior of birds called 'particle swarm optimization' to estimate the value of ranks for the denoising of multispectral images in the wavelet paradigm. A setup has been built in Fraunhofer Institute IIS, and two academic collaborations yielded an application in fluorescence imagery and multispectral X-rays. Then, the field of applied mathematics which is meta-heuristics being widely considered in the community, we decided to create an innovative bio-inspired optimization method, able to estimate parameter values jointly in both discrete and continuous search spaces. We have called this new bio-inspired optimization method the mixed grey wolf algorithm, because it gets inspired by the behavior of wolves. We have tested our method on an application of joint denoising and unmixing of multispectral images.

Remerciements

Je remercie les membres du jury : Pascal Larzabal, Eric Moreau, Yide Wang, Régine Le Bouquin-Jeannès, Claire Migliaccio, Camel Tanougast, Jacques Blanc-Talon d'avoir accepté d'évaluer mes travaux, présentés en vue de l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches. C'est une chance pour moi que d'avoir pu les réunir lors de ma soutenance, eux qui sont de grands spécialistes de l'acquisition, et du traitement des signaux et des images.

Je remercie le Professeur Salah Bourennane pour son soutien indéfectible depuis ces années passés dans l'équipe GSM. Salah m'aura fait progresser et donné suffisamment d'indépendance. C'est également tous les membres de l'équipe GSM que je remercie pour leur compagnie agréable au laboratoire : Caroline, Ali, Mouloud, Thierry. Au même titre je remercie le Directeur du Laboratoire Institut Fresnel Stefan Enoch, et tous les membres de l'Institut Fresnel. Notamment Jean Cayzac et Frédéric Forestier pour leur soutien sur les aspects informatique, mais aussi mes autres collaborateurs tels Anabela, Sébastien, etc.

Je remercie tous mes thésards, Haiping, Nabil, Abir, Benoit, pour leur écoute et leur enthousiasme.

Je remercie également tous mes partenaires industriels, tel Klaus de l'Institut Fraunhofer IIS, Detect Reseaux, Matole, Intuisense, entre autres.

Enfin bien sûr je remercie ma famille et mes amis, mes parents, Betty, André, Jean-Jacques, notamment pour leur soutien lors de la préparation de ma soutenance. Je remercie, pour tout, Ania, Lucas et Zélie.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Liste des figures	10
Liste des tableaux	13
1 Rapport d'activités : parcours académique et scientifique	14
1.1 Notice individuelle	15
1.1.1 Identification	15
1.1.2 Biographie	16
1.1.3 Responsabilités administratives et d'intérêt général	17
1.1.4 Encadrements	18
1.1.5 Contrats et collaborations industrielles	20
1.1.6 Activités d'enseignement : volumes horaires	21
1.2 Introduction à la synthèse de mes activités d'enseignement et de recherche	24
1.2.1 Introduction à mes activités d'enseignement	24
1.2.2 Introduction à mes activités de recherche	26
1.3 Liste de publications	37
1.3.1 Revues internationales	37
1.3.2 Conférences internationales avec comité de lecture	39
1.3.3 Chapitre de livre	42
2 Synthèse des activités d'enseignement	43
2.1 Enseignements en termes de compétences pédagogiques	44
2.1.1 Concevoir un enseignement	44
2.1.2 Utiliser les différentes Technologies de l'Information et de la Communication	46
2.1.3 Transmettre des savoirs universitaires	47
2.1.4 Encadrer et accompagner l'étudiant	49
2.1.5 Evaluer les apprentissages	50
2.1.6 Travailler en équipe	51
2.1.7 Coordonner un programme pédagogique universitaire	52
2.1.8 Réfléchir à sa pratique pédagogique et la faire évoluer, échanger sur sa pratique avec d'autres enseignants	53
2.2 Activités d'enseignement : bilan et perspectives	56

2.3	Annexe : Enquêtes de satisfaction et illustrations	59
2.3.1	Enquêtes de satisfaction	59
2.3.2	Maquettes Raspberry, illustrations	59
3	Rappels concernant ma thèse	65
3.1	Introduction	65
3.2	Estimation de contours rectilignes	65
3.2.1	Modèle de données, génération de signaux à partir d'une image	65
3.2.2	Méthode d'estimation des angles, résumé de la méthode SLIDE	67
3.2.3	Estimation des valeurs d'offset	68
3.2.4	Quelques exemples	69
3.3	Contours circulaires	69
3.3.1	Position du problème et génération de signal virtuel	70
3.3.2	Méthode d'estimation du rayon	72
3.3.3	Antenne linéaire pour l'estimation des coordonnées du centre	72
3.3.4	Quelques résultats de caractérisation de cercles	73
3.4	Optimisation globale et interpolation par spline pour l'estimation de contours distordus	75
3.4.1	Quelques notions d'optimisation globale déterministe	75
3.4.2	Contours approximativement rectilignes distordus	75
3.4.3	Contours approximativement circulaires distordus	77
3.4.4	Quelques résultats	78
3.5	Rappels concernant ma thèse : conclusion	80
4	Caractérisation de contours flous et distordus, application industrielle	82
4.1	Caractérisation de contours flous	82
4.1.1	Position du problème	82
4.1.2	Modèles de signaux pour les contours flous	84
4.1.3	Méthodes par sous-espaces pour l'estimation de paramètres de contours flous	87
4.1.4	Algorithme d'optimisation pour l'estimation de l'étalement des contours flous	90
4.1.5	Quelques résultats	92
4.2	Caractérisation de contours étoilés très distordus	93
4.2.1	Méthodologie	93
4.2.2	Résultats	97
4.3	Détection de contours pour une application industrielle	100
4.3.1	Position du problème	100
4.3.2	Algorithme proposé	100
4.3.3	Résultats	103

4.3.4	Bilan	104
4.4	Conclusion	106
5	Interface homme machine et systèmes de vision	107
5.1	Introduction	107
5.2	Etude Bibliographique	107
5.2.1	La détection faciale en traitement d'images	107
5.2.2	Le suivi d'objet en traitement d'images	108
5.2.3	La reconnaissance d'objet en traitement d'images	112
5.3	Caractérisation de contours non étoilés et application à la reconnaissance de postures de la main	115
5.3.1	Caractérisation des postures de la main par une nouvelle signature : introduction	115
5.3.2	Génération de la signature	115
5.3.3	Bilan	119
5.4	Mesure d'audience par système de vision	119
5.4.1	Objectifs de l'algorithme proposé	120
5.4.2	Algorithme ISAM : algorithme	120
5.4.3	Algorithme ISAM : performances	123
5.5	Interface homme machine dans un contexte industriel : exploitation d'images géoradar	126
5.5.1	Présentation du projet	126
5.5.2	Méthodologie	126
5.5.3	Résultats	128
5.5.4	Bilan	130
5.6	Conclusion	130
6	Optimisation bio-inspirée : création d'un algorithme GWO mixte	132
6.1	Méthodes d'optimisation méta-heuristiques bio-inspirées : Introduction générale	132
6.2	Le mixed Grey Wolf Optimizer	134
6.2.1	Improved discrete Grey Wolf Optimizer	134
6.2.2	Global Continuous Grey Wolf Optimizer	139
6.2.3	Extension au mixedGWO	140
6.3	Application du GWO mixte à l'estimation simultanée de paramètres pour le débruitage et le démelange de données multispectrales	143
6.3.1	Introduction	143
6.3.2	Description de l'application proposée	143
6.3.3	Débruitage et démelange d'images multispectrales : bilan	152
6.4	Algorithme GWO mixte : bilan et évolutions futures	153
7	Débruitage de données multidimensionnelles par le filtrage tensoriel dans le domaine des ondelettes	154

7.1	Introduction au filtrage tensoriel	154
7.1.1	Les données tensorielles	154
7.1.2	Le filtrage tensoriel	155
7.2	Estimation automatisée de paramètres dans le domaine des ondelettes pour le débruitage de données tensorielles	156
7.2.1	Introduction	156
7.2.2	Le verrou : l'estimation des valeurs de rangs dans un contexte multidimensionnel	156
7.2.3	Filtrage de Wiener multimodal dans le domaine des ondelettes	156
7.2.4	Critère proposé pour l'estimation optimale des valeurs de rang	157
7.2.5	Filtre de Wiener non supervisé dans le domaine des ondelettes	158
7.3	Application au débruitage de données multispectrales en fluorescence et RX	163
7.3.1	Introduction	163
7.3.2	Imagerie de plantes en fluorescence	163
7.3.3	Tomographie par rayons X multispectraux	168
7.4	Conclusion	171
8	Projet de recherche	172
8.1	Contexte actuel, introduction	172
8.2	Adaptation et application du GWO mixte	173
8.2.1	Application du GWO mixte au démélange contraint de spectres	173
8.2.2	Estimation de paramètres dans la théorie du traitement d'antenne	174
8.2.3	Quelques évolutions envisagées pour les aspects théoriques du GWO mixte	175
8.3	Estimation de paramètres dans le contexte du radar	176
8.4	Reconversion thématique vers la reconnaissance d'images et le morphing en robotique	180
8.4.1	Court terme	180
8.4.2	Moyen terme	181
8.4.3	Long terme	182
8.5	Conclusion	183
	Bibliographie	184

Liste des figures

2.1	Raspberry Pi	60
2.2	RPi avec connectique ; setup complet	60
2.3	Setup pour un projet : Jérôme Mimouni au travail ; résultat de détection de points saillants obtenu sur Alban Albertengo	61
2.4	Résultat de détection de points saillants obtenu sur Alexandre Darmon ; utilisation des points saillants pour une application de morphing par Lucas Sirerol et Alexandre Darmon	61
2.5	Morphing appliqué à des personnes non impliquées dans le projet	62
2.6	Schéma de classe du TP collaboratif	62
2.7	Résultat obtenu par des étudiants : extrait de code et image de détection	63
3.1	Modèle d'image : (a) L'image-matrice, munie d'un ensemble de capteurs virtuels formant une antenne de N capteurs équidistants, (b) Une ligne droite caractérisée par son angle θ et son offset x_0 .	66
3.2	Application de détection de contours : (a) - Image transmise ; (b) détection des rails pour contrôler la progression du robot ; (c) localisation de la première traverse.	70
3.3	Contour étoilé : rayon r du cercle, décalage $\Delta\rho$.	71
3.4	Antenne circulaire à S capteurs	71
3.5	Contours approximativement rectilignes ou ellipses. r est le rayon, a et b les paramètres axiaux de l'ellipse.	73
3.6	Un cercle : estimation de rayon : (a) Méthode proposée, (b) Transformée de Hough.	73
3.7	Contour approximativement rectiligne distordu. Décalages $\Delta x(i)$	76
3.8	Quart de contour étoilé, coordonnées (ρ, θ) . Rayon r du cercle. Décalage $\Delta\rho$.	77
3.9	Exemples d'images à traiter contenant le contour le moins (a) et le plus distordu (d), l'initialisation (b,e) et l'estimation finale utilisant la méthode proposée (c,f). ME : 1.4 pixel et 2.7 pixels.	78
3.10	Exemples d'images à traiter contenant le contour le moins (a) et le plus distordu (d), l'initialisation (b,e) et l'estimation finale utilisant la méthode Gradient Vector Flow (c,f). ME : 1.4 pixel et 4.1 pixels.	79
3.11	Application à une image 'réelle' : (a) Image à traiter, (b) Opérateur Canny, (c) Initialisation, (d) Gradient, (e) GVF, (f) DIRECT et interpolation par spline.	80

4.1	Modèles de contour : (a) contours flous d'orientations principales θ_1, θ_2 , d'offsets x_{01} et x_{02} , et de largeur $2X_f$; (b) contour flou circulaire caractérisé par le centre $\{l_c; m_c\}$, le rayon r_0 , et la largeur $2r_f$.	83
4.2	Génération de signal : (a) antenne linéaire pour la génération de $z(1), z(2), \dots, z(N)$ sur les côtés gauche et en bas, contour flou d'orientation θ et d'offset x_0 ; (b) sous-image de taille $N_S \times N_S$ antenne circulaire [110] pour la génération de $z(1), z(2), \dots, z(S)$ sur chaque direction de génération D_i , quart de contour flou	83
4.3	Contour flou linéaire : (a) image traitée avec un contour flou et un contour de largeur 1 pixel; (b) pseudo-spectre de MUSIC; (c) contours centraux; (d) resultat final	92
4.4	Contour flou circulaire : (a) image à traiter; (b) cercle d'initialisation; (c) resultat final; (d) Chan et Vese	93
4.5	Modèle pour une image contenant un contour étoilé très distordu	94
4.6	Détection de contour très distordu : (a) image à traiter : faible perturbation de contour et paramètres de bruit ($0, 10^{-2}$); (b) image à traiter, grande perturbation de contour et paramètres de bruit ($0, 10^{-2}$); (c) initialisation dans les deux cas; (d-f) résultats obtenus sur 'a' : méthode proposée ($ME_x = 1.58$), Gradient ($ME_x = 1.78$), GVF ($ME_x = 1.90$); (g-i) résultats obtenus sur 'b' : méthode proposée ($ME_x = 1.86$), Gradient ($ME_x = 2.25$), GVF ($ME_x = 2.42$).	99
4.7	Application considérée à l'Institut Fraunhofer IIS : (a) Système industriel d'acquisition d'image; (b) Pièce métallique industrielle avec des défauts	101
4.8	Combinaison d'algorithmes de morphologie mathématique et d'un levelset : estimation successive de contours à fort et faible contraste	102
4.9	Application considérée à l'Institut Fraunhofer IIS : (a) pièce de référence - résultat de segmentation, (b) pièce de référence - superposition; (c) pièce avec défaut - résultat de segmentation, (d) pièce avec défaut - superposition, (e) Méthode de texture, (f) méthode Markov	105
4.10	Carte des contours sur la pièce avec défauts, défauts détectés, superposition	106
5.1	Les deux premières caractéristiques pseudo-Haar pour la detection de visages humains	108
5.2	Fonctionnement d'un classifieur en cascade	108
5.3	Exemples de résultats obtenus avec la méthode de Viola-Jones	109
5.4	Optical Flow	110
5.5	Hypothèses à propos de l'Optical Flow de Lucas-Kanade	110
5.6	Optical Flow de Lucas-Kanade "pyramidal"	111
5.7	SVM : illustration	113
5.8	Dictionnaire de 11 postures de la main	116

5.9	Caractérisation de posture : (a) Image et modèle de contour; (b) Méthode de génération de signal.	117
5.10	Caractérisation de posture : (a) Contour segmenté; (b) Contour reconstruit à partir de la signature Z .	118
5.11	Partie détection de ISAM	121
5.12	Partie suivi de ISAM	122
5.13	Résultats qualitatifs de ISAM	124
5.14	Résultats qualitatifs de ISAM : sélection de l'utilisateur	124
5.15	Le Georadar	127
5.16	L'interface homme machine du géoradar	127
5.17	Image de référence : prétraitement, sélection manuelle d'une hyperbole à suivre, débruitage	129
5.18	Image de test : recherche de l'hyperbole dans une ROI	130
6.1	Valeurs de a en fonction de l'indice d'itération pour $T_{max} = 3000$ et $\eta = 2$	142
6.2	PaviaU $32 \times 32 \times 4$ et PaviaU $256 \times 256 \times 103$: images non bruitées	147
6.3	PaviaU $32 \times 32 \times 4$ et PaviaU $256 \times 256 \times 103$: endmembers s_1 (noir) et s_2 (bleu), et le spectre attendu y (rouge)	147
6.4	PaviaU $256 \times 256 \times 103$: (a) non bruitée, (b) bruité 10 dB, et (c) image de référence	148
6.5	PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Images débruitées obtenue avec (a) amixedGWO, (b) PSO, (c) GWO	148
6.6	PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Images débruitées obtenue avec (a) ABC, (b) TSA, (c) GA, (d) SA	149
6.7	PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Spectres réel, débruité, et reconstruit obtenus avec : (a) amixedGWO, (b) PSO, (c) GWO	150
6.8	PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Spectres réel, débruité, et reconstruit obtenus avec : (a) ABC, (b) TSA, (c) GA, (d) SA	151
6.9	Courbes de convergence moyennes avec $SNR_{in} = 10$ dB et une référence Fourier Wiener \mathcal{X}_1	152
7.1	Estimation de rang pour le filtre de Wiener multidimensionnel avec une méthode d'optimisation globale dans le domaine des ondelettes : processus itératif	162
7.2	Schéma Experimental	164
7.3	Setup : induction et imagerie d'un phénomène de fluorescence de feuille d'arbre	164
7.4	Fluorescence induite sur une feuille d'arbre, domaine de longueur d'onde d'intérêt. En abscisse : longueur d'onde en nm. En ordonnée : réflectance (valeur relative).	165
7.5	Imagerie en fluorescence de feuille : a) grande image ; b) zoom 1 ; c) zoom 2.	165

7.6	Imagerie en fluorescence de feuille (0 dB) : a) acquisition bruitée; b) MM-PSO; c) MM-Iteratif.	166
7.7	Imagerie en fluorescence de feuille (15 dB) : a) acquisition bruitée; b) MM-PSO; c) MM-Iteratif.	167
7.8	Plan du prototype PIXSCAN	168
7.9	Image R-X, bruitée avec du bruit Gaussien à 10 dB. Rangs de référence 20 % : a) Pure; b) Bruitée; c) MM-PSO	169
7.10	Image R-X, bruitée avec du bruit Gaussien à 30 dB. Rangs de référence 20 % : a) Pure; b) Bruitée; c) MM-PSO	169
7.11	Image R-X, naturellement bruitée avec du bruit de Poisson (zoom). a) image brute; b) MM-PSO avec des rangs en référence à 60 %; c) MM-PSO avec des rangs en référence à 20 %,	170
8.1	Scanner 3D pour deux positions d'antenne	177
8.2	Pistolet, pistolet caché	177
8.3	Pistolet caché : résultats de segmentation. (a) polarisation H : image à traiter; (b) polarisation V : image à traiter; (c) polarisation H : morphologie mathématique; (d) polarisation V : morphologie mathématique	178
8.4	Combinaison H et V	178

Liste des tableaux

1.1	Etat civil	15
1.2	Contact	15
1.3	Carrière et fonction actuelle	16
1.4	Thèse de doctorat	17
1.5	Diplômes antérieurs au doctorat	17
1.6	Détection de contours	30
1.7	Interfaces Homme Machine	31
1.8	Optimisation bio-inspirée	31
1.9	Traitement du signal tensoriel	31
3.1	Contours approximativement linéaires et circulaires distordus	80
5.1	Résultats obtenus sur les vidéos de la ChokePoint database	123
6.1	Espaces de recherche pour les méthodes d'optimisation. Le symbole • signifie "inutile"	146
6.2	Résultats de débruitage SNR_{out} pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence \mathcal{X}_1	149

6.3	Résultats d'erreur de reconstruction de spectre RE pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence λ_1	150
6.4	Résultats de valeur de critère finale pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence λ_1	151
8.1	Espaces de recherche pour la méthode d'optimisation	179

1 Rapport d'activités : parcours académique et scientifique

1.1 Notice individuelle

1.1.1 Identification

Nom :	Marot
Prénom :	Julien
Date et lieu de naissance :	22 décembre 1980 à Montpellier
Situation familiale :	Marié, 2 enfants
Nationalité :	Française

Table 1.1 – Etat civil

Coordonnées :	Equipe GSM Campus Universitaire de Saint-Jérôme 52 Avenue Escadrille Normandie Niemen 13013 Marseille 04 91 28 27 49
---------------	--

Mail :	julien.marot@fresnel.fr julien.marot@univ-amu.fr
Page Web :	http://www.fresnel.fr/perso/marot

Table 1.2 – Contact

1.1.2 Biographie

1.1.2.1 Déroulé de carrière

Juillet 2017 :	Passage 6�me échelon MCF
Septembre 2014 :	Passage 5�me échelon MCF
Septembre 2009 :	Maître de Conférences Equipe Groupe Signaux Multidimensionnels Institut Fresnel, UMR 7249 Département Informatique et Interactions Aix-Marseille Université Site de Saint-Jérôme
Mars 2009 – Août 2009 :	Chercheur à l'institut Fraunhofer, contrat Fraunhofer IIS Erlangen, Allemagne
Mars 2008 - Février 2009 :	Post-Doctorat à l'Institut Fraunhofer IIS Caractérisation de contours multiples, applications industrielles Erlangen, Allemagne

Table 1.3 – Carrière et fonction actuelle

1.1.2.2 Formation

2004-2007 :	Thèse de doctorat en traitement du signal
Titre :	Méthodes par sous-espaces et d'optimisation : application en traitement d'antenne, analyse d'image et traitement du signal tensoriel
Laboratoire d'accueil :	Institut Fresnel, équipe GSM, Marseille
Financement :	Région-entreprise (Entreprises Systemia, Shaktiware)
Ecole doctorale :	Physique et sciences de la matière
Directeur de thèse :	Professeur Salah Bourennane, PU 61ème section
Date de soutenance :	16 novembre 2007
jury :	PR Eric Moreau, Rapporteur, Univ. Toulon Var PR Yide Wang, Rapporteur, Univ. de Nantes DR Jean-Pierre Sessarego, Président, LMA CNRS Marseille DR Hamid Aghajan, Examineur, Stanford University DR Jacques Blanc-Talon, Examineur, DGA/MRIS PR Salah Bourennane, Directeur de thèse, Centrale Marseille

Table 1.4 – Thèse de doctorat

2003-2004 :	Diplôme d'Etudes Approfondies Optique Image et Signal (OIS)
Lieu :	Université Aix-Marseille 3
2002-2003 :	Troisième année de cursus Ingénieur, spécialité traitement du signal et des images
Lieu :	Tampere University of Technology, Finlande
2000-2003 :	Diplôme d'Ingénieur en Physique (option traitement du signal)
Lieu :	Ecole nationale supérieure de Physique de Marseille
1998-2000 :	Classes préparatoires PCSI-PC
Lieu :	Lycée Joffre, Montpellier

Table 1.5 – Diplômes antérieurs au doctorat

1.1.3 Responsabilités administratives et d'intérêt général

Responsabilités pédagogiques

A mon service en CM, TD, TP dans le département 'Math info système', devenu en 2012 'Informatique et Interactions', s'ajoute à partir de 2015-2016 une responsabilité pédagogique équivalente à 9 heures TD pour des salles de TP (B311-B312). A partir de 2016-2017 je deviens co-responsable, puis responsable à part entière (en 2017), d'un parcours de troisième année de Licence Sciences pour l'Ingénieur

(SPI). Cela conduit à une équivalence de service de 6, puis 12, et enfin 20 heures. Il s'agit du parcours AGE (devenu EEA en 2018) de la Licence 3 SPI.

Membre de commission

Depuis 2016, je suis membre de la commission d'enseignement d'Aix Marseille Université.

Participation à des comités d'examen et de recrutement

J'ai participé au comité de recrutement de Zhongliang Li en 2016 et de Séverine Dubuisson en 2017 et à la sélection de trois ATER en 2018.

J'ai participé en tant qu'examinateur au jury de thèse de Tao Lin (directeur de thèse Salah Bourenane), et Inès el Ouedi (directeur de thèse Amine Nait-Ali).

1.1.4 Encadrements

1.1.4.1 Post-doc

- Paul Lauga, projet Scanvision, octobre 2017- septembre 2018, Financement FUI.

1.1.4.2 Thèses soutenues

- Benoit Martin, Algorithmes d'optimisation bio-inspirés, application à l'analyse d'images multispectrales et à la reconnaissance de visages, soutenue le 26 octobre 2018, bourse ANRT - Intuisense.
- Abir Zidi, Méthodes par sous-espaces et algorithmes d'optimisation bio-inspirés pour le débruitage de signaux multi-dimensionnels et applications, soutenue le 12 juillet 2017, bourse BFS (Bayerische Forschungstiftung Allemagne).
- Nabil Boughnim, Traitement du signal pour la reconnaissance de gestes et application à une interface homme machine sans contact, soutenue en septembre 2013, bourse de la Région 'Provence Alpes cote d Azur'.
- Haiping Jiang, Détection et caractérisation de contours dans des images par des méthodes par sous-espaces, soutenue en septembre 2011, bourse du gouvernement Chinois.

1.1.4.3 Stages de Master

- Israel de Araujo Nascimento, Algorithmes d'optimisation pour la co-conception d'un système radar, à soutenir en juillet 2019, Stage Alternant recherche Ecole Centrale Marseille
- Xavier Naïdi, Système embarqué, Raspberry Pi et Arduino communicants pour robot autonome, soutenu en novembre 2018, Stage 2A Ecole Centrale Marseille.

- Noura Neji, Imagerie hyperspectrale et controle non-destructif de surfaces métalliques au défilé, soutenu en septembre 2018, Aix Marseille Université - Mermec France.
- Damien Alberola, Développement d'une application pour l'utilisation de cadre infrarouge sur distributeur automatique, soutenu en septembre 2016, Aix Marseille Université - IntuiSense Technologies.
- Christophe Froche, Imagerie hyperspectrale et débruitage par ondelettes pour la biologie, soutenu en septembre 2014, Aix Marseille Université.
- Abir Zidi, Nouveaux Critères pour la Factorisation en Matrices Non-Negatives et Application à l'imagerie hyperspectrale, soutenu en septembre 2013, Aix Marseille Université, Institut Fraunhofer IIS.
- Fadhila Moussouni, Détection de zones malades sur des feuilles par imagerie hyperspectrale et méthodes algébriques, soutenu en juillet 2012, Ecole Centrale Marseille.
- Nabil Boughnim, Code en C pour flux optique en traitement d'images, soutenu en juillet 2010, IntuiSense Technology.
- Florian Joyeux, Décomposition de Parafac pour l'imagerie hyperspectrale, soutenu en juillet 2010, Kaolab.

1.1.4.4 Projets de Master et de Licence

- Abdelhak Dahmani, Houssam Ajaha, Idriss ElKhoulimi, Les nano-ordinateurs pour une application d'intelligence artificielle, janvier-mai 2019, Projet M1 EEEA.
- John Van Haute, Maxime Vincent, Rostom Tahtah, Allan Carpot, Interface d'optimisation bio-inspirée, janvier-mai 2019, Projet M1 EEEA (avec Rania Trigui, ATER).
- Nicolas Bru, Adrien De Bischof et Oussama Djaid, Transmission de données pour une application en robotique, janvier-mai 2019, Projet M1 EEEA.
- Serigne-mbacke Gaye, Ibou-laye Ba, cheikh-ahmath-bamba Diop, Reconnaissance de visage par apprentissage profond, janvier-mai 2019, Projet M1 TSI.
- Maxime Barre, Michael Busquet, Aymeric Eixarch, Morphing automatisé par sélection automatique de points de contrôle, janvier-mai 2019, Projet M1 TSI.
- Hocine Kenouni, Mejdeddine Nemsy, Faouzi Hakimi, Moncef Boujou, Optimisation bio-inspirée et traitement d'images sur Raspberry Pi, janvier-Février 2019, Projet M2 TSI (avec Rania Trigui, ATER).
- Natena Koule, Jesus Diaz, Caractérisation d'un système d'acquisition Vision de nuit par imagerie HSI, décembre 2018-février 2019, Projet M2 POE-SII.
- Guebailia Walyd, Djermoune Nabil, et Maouia Ahlem, Imagerie en polarisation pour le contrôle non destructif de surfaces métalliques, janvier-mai

- 2018, Projet M1 (avec Mermec France).
- Souche Florian, Sirerol Lucas, et Ponnayoy Maxime, Contrôle non destructif de containers par imagerie hyperspectrale et optimisation, janvier-février 2018, Projet M2 (avec Mermec France).
- Mansouibou Sitti, Babe Ely, et Zaki Sayed, Imagerie hyperspectrale pour le contrôle non-destructif de peintures, janvier-février 2018, Projet M2 (avec Mermec France).
- Shiyu Deng, Chen Te Lin, Visual Basic : Interface graphique pour implantation du filtre de Wiener multidimensionnel, janvier-mai 2017, Projet M2 POESII.
- Alaa GAIED, Hongcheng Liao, Traitement d'images embarqué sur Raspberry Pi, janvier-février 2017, Projet M2.
- Masouibou Sitti, Alexandre Darmon, Lucas Sirerol, Florian Viola, Morphing sur Raspberry Pi, janvier-mai 2017, Projet M1.
- Rémi Campo, Melvyn Dumas, Comparaison des algorithmes PSO et GWO, janvier-mai 2017, Projet M1.
- Hadrien Blanc, Maxime Traverse, Interface de traitement d'images multispectrales, janvier-mai 2017, Projet M1.
- Reymond Matthieu, Albertengo Alban, Détection de visage avec OpenCV sur Raspberry Pi, Juin 2016, Stage Licence 2 (CMI).
- Jérôme Mimouni, Damien Albérola, et Romain Salerno, Traitement d'images et transfert de données sur Raspberry Pi, janvier-février 2016, Projet M2.
- Nahidi Said et Yannick Essono, Critères de similarité pour des images, janvier-mai 2016, Projet M1.
- Alban Datin, Radhesh Busgeeth, et Florent Chaloin, Découverte du Raspberry Pi, janvier-février 2015, Projet M2.
- Damien Albérola et Romain Salerno, Analyse de code en C pour implantation du flux optique, janvier-mai 2015, Projet M1.
- Encadrement de 2 à 8 étudiants en projet de Master chaque année Traitement d'images, analyse de code C, etc.

1.1.5 Contrats et collaborations industrielles

Lors de ma carrière de Maître de Conférences j'ai pu collaborer avec les entreprises suivantes :

- Detect Reseaux et Matole SAS, dans le cadre de la conception d'une interface de suivi de forme d'intérêt dans une image radar
- Bowen et VSM, dans le cadre du projet FUI ScanVision
- Intuisense Technologies, dans le cadre de l'encadrement de deux doctorants et d'un stagiaire de Master ;
- Institut Fraunhofer IIS, dans le cadre de la thèse d'une doctorante en cotutelle avec l'Allemagne ;
- Mermec France, dans le cadre de l'écriture d'un projet Franco-Allemand

concernant la sécurité des infra-structures, puis lors de projets étudiants.

1.1.6 Activités d'enseignement : volumes horaires

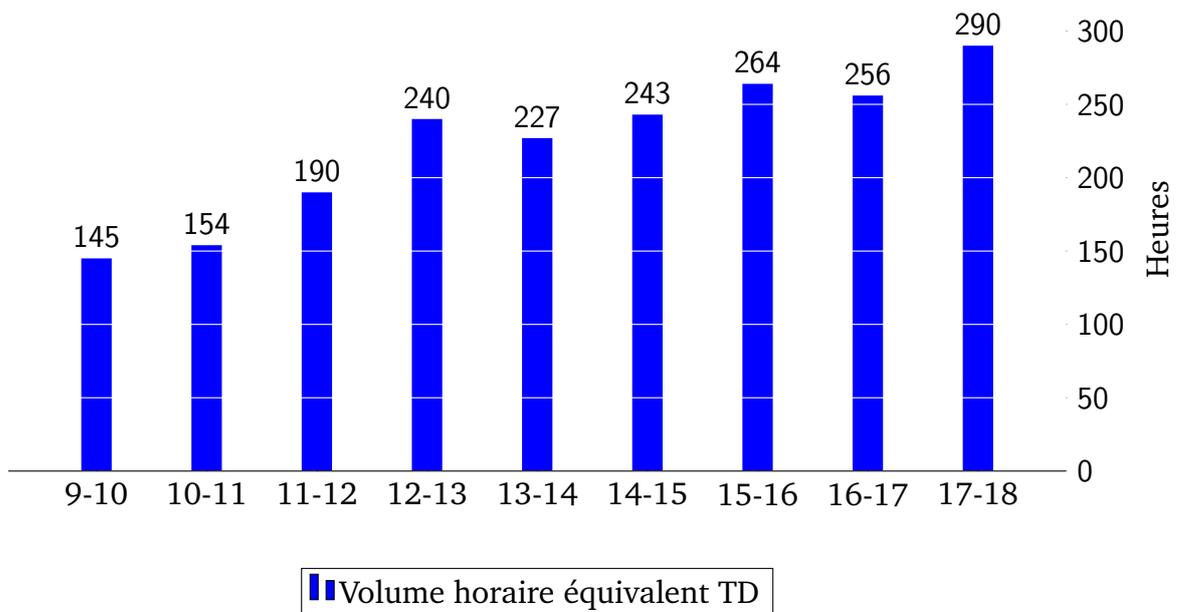
Lors de ma thèse, j'ai effectué des enseignements à l'Ecole Centrale Marseille de 2005 à 2007, à l'IUT GEII de Salon-de-Provence de 2005 à 2006, et à l'université d'Aix Marseille III de 2006 à 2007. A l'école Centrale Marseille il s'agissait de 98 heures équivalent TD (HETD) en traitement du Signal numérique, traitement d'images, spatio-temporel, automatique, semi-conducteurs et micro-électronique. A l'IUT de Salon-de-Provence, il s'est agi de 44 HETD en automatique, et à l'université en L1 de valorisation de la communication, et recherche documentaire pour 26 HETD.

Dans les paragraphes qui suivent je décris mon service d'enseignement à partir de septembre 2009, date à laquelle j'ai été nommé Maître de Conférence à Aix-Marseille Université. Je décris son évolution dans le temps dans sa globalité, puis détaille l'évolution des thématiques abordées, et enfin son évolution en termes de public. Ces données sont essentiellement numériques. Une description plus qualitative de mon investissement dans mes activités d'enseignement est fournie plus loin dans ce manuscrit.

1.1.6.1 Service d'enseignement : évolution dans le temps

Dans sa globalité, le volume horaire associé à mon service d'enseignement a eu tendance à augmenter entre mon début de carrière et le présent.

Volumes d'enseignement en HETD



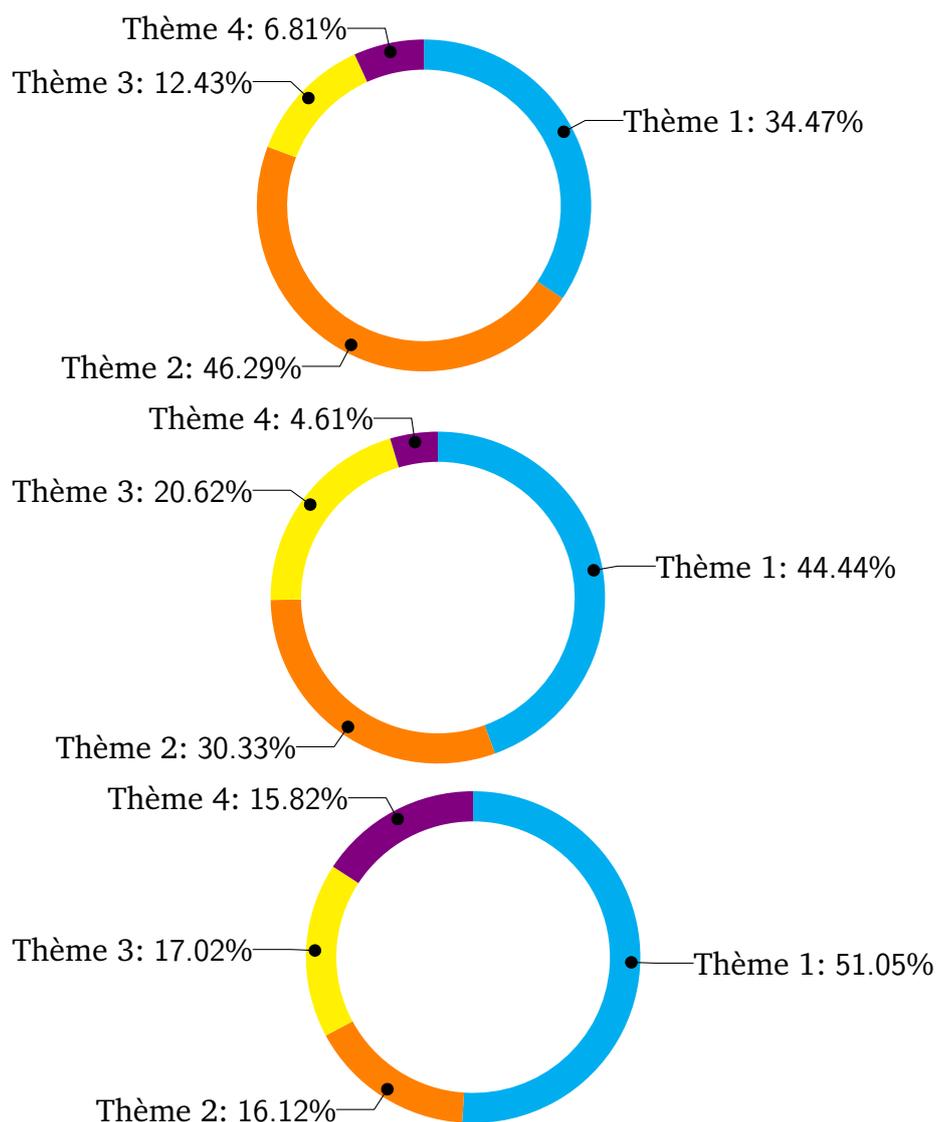
Dans l'évolution du volume horaire présenté dans l'histogramme 1.1.6.1, on remarque une augmentation régulière de la charge d'enseignement. Celle-ci cache une disparité dans mon service selon les années dans les thèmes enseignés et dans les publics que je décris dans les paragraphes suivants.

1.1.6.2 Répartition de service par thème

Mes activités d'enseignement à Aix Marseille Université peuvent être divisées en quatre thème :

1. Thème 1 : Informatique industrielle, automatismes ;
2. Thème 2 : Automatique, régulation industrielle ;
3. Thème 3 : Traitement d'image, traitement du signal, étude des systèmes échantillonnés ;
4. Thème 4 : Projets de réalisation

Voici la répartition de mes activités en 2009-2010, 2013-2014, et 2017-2018.



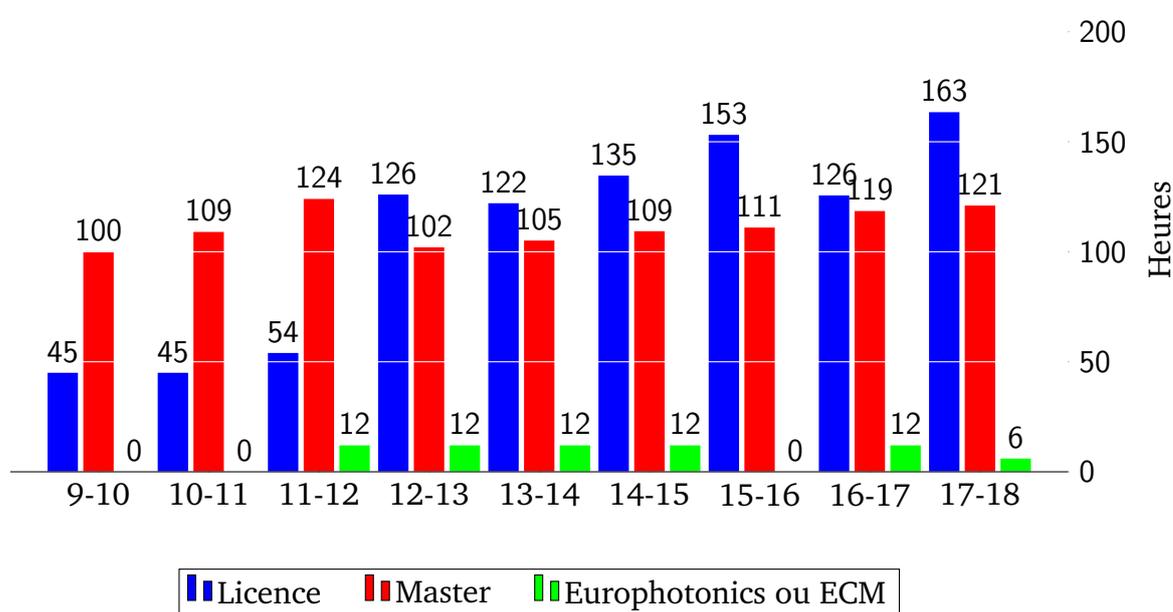
On note que le thème 1 est de plus en plus prépondérant, au détriment du thème 2 ; que la proportion d'activités dans le thème 3 reste à peu près stable, et que la part du thème 4 tend à augmenter. Cela traduit ma volonté de m'impliquer davantage qu'en tout début de carrière dans les enseignements d'automatismes et informatique industrielle, et dans l'encadrement d'étudiants en projet ; tout en conservant une part significative (plus ou moins importante selon les années et les besoins de l'équipe pédagogique) d'activités dans le thème 3.

1.1.6.3 Répartition de service par public

Dans ce descriptif je scinde en trois catégories le public des mes enseignements. Premièrement les étudiants en Licence à Aix Marseille Université : Li-

cence 2 SPI (sciences pour l'Ingénieur), Licence 3 SPI parcours AGE (Automatique et Génie Electrique) devenu EEA (Electronique, Electrotechnique et Automatique), Licence CSSA (Contrôle et Supervision des Systèmes Automatisés), et Licence Pro MEP (Maintenance des Equipements de Production), devenue 'MSIPE' (Maintenance de Systèmes Industriels de Production et Énergie) - Parcours MEP. Deuxièmement les étudiants en Master Image et Systèmes devenu EEEA (Electronique, Energie Electrique, et Automatique). Troisièmement, des étudiants multinationaux d'une formation adossée à l'UFR Sciences qui est le Master-Doctorat POESII-Europhotonics soit pour de l'encadrement de projet en Master, soit pour des TD/TP pour en Doctorat.

Service d'enseignement par public



En section suivante je présente une introduction plus qualitative à mes activités d'enseignement, puis une introduction à les activités de recherche.

1.2 Introduction à la synthèse de mes activités d'enseignement et de recherche

Il m'a semblé important dans ce manuscrit d'aborder mon activité d'enseignant chercheur sous ses deux aspects, non seulement la recherche mais aussi l'enseignement, en ce qu'il a de plus innovant et/ou de plus profitable à mes pairs.

1.2.1 Introduction à mes activités d'enseignement

Dans le chapitre 2 je décris mes activités d'enseignement de façon transverse, en présentant mes méthodes de conception d'un enseignement, d'utilisation des technologies et outils multimédia, la façon dont je peux ajuster une séquence d'enseignement...

J'interviens dans des formations dont voici les caractéristiques :

La Licence 2 SPI (Sciences pour l'Ingénieur) est enseignée sur deux sites, Saint-Jérôme et Aix-Montperrin. Les promotions de Saint-Jérôme comprennent environ 60 étudiants, celles d'Aix-Montperrin environ 40, en constante augmentation. Je suis responsable de l'UE 'Informatique Industrielle' en L2 SPI depuis 2012, sur les deux sites.

La Licence 3 SPI AGE (qui devient EEA à partir de 2018-2019) est enseignée sur le site de Saint-Jérôme, et comprenait 50 étudiants en 2017-2018, 54 en 2018-2019. Je suis responsable de ce parcours, à 50 % en 2016-2017, puis à 100 % à partir de 2017-2018 ; ainsi que de l'UE 'Automatismes et Informatique Industrielle' en L3 SPI AGE depuis 2015.

Le Master Image et Systèmes spécialité automatique et génie électrique (qui devient EEEA en 2018) est dispensé à Saint-Jérôme, et compte en général 30 à 40 étudiants par promotion, jusqu'à 60 en 2018-2019. J'y intervins en M1 pour des CM, TDs, TPs, et projets, et en M2 pour des projets.

Les personnels AMU que je cite et avec lesquels j'interagis appartiennent à " l'équipe pédagogique 61-63 " qui comprend notamment les responsables de formation Licence MEP (Mustapha Ouladsine), Master EEEA (Rachid Outbib), Master TSI (Mouloud Adel), mais aussi Pascal Mestre (ancien responsable de la Licence 3 SPI AGE), Thibaut Raharijaona, Zhongliang Li, etc. Les personnels non permanents de l'équipe que je cite sont des ATER et des doctorants (Zouhair Haddi, Imène Garali, Mustapha Niane, etc.).

Depuis le début de l'année 2016, je coopère avec l'équipe de portage de la Licence SPI (Gilles Cartry, Carine Perrin-Pellegrino, Karin Coulié puis Bénédicte Ealet) pour établir la nouvelle accréditation de la Licence SPI.

Enfin le personnel du SESAO sur le site de Saint-Jérôme est constitué par Marzenna Zoppitelli, Gilles Sanmartin, Alfonso Salgueiro, Romain Guieu, etc. Je travaille avec ces personnes essentiellement dans le cadre de ma responsabilité de salle informatique/TP B311/B312 (une PRP de 9 heures m'est attribuée pour cela entre 2012 et 2018).

Certains documents sont à la disposition des étudiants sur la page 'Teaching' de mon site Web, que l'on pourra consulter :

<http://www.fresnel.fr/perso/marot/#Teaching>

La liste des étudiants que j'ai encadrés en Licence et Master est disponible sur la page Web suivante :

<http://www.fresnel.fr/perso/marot/#Supervision>

J'ai valorisé mon investissement pédagogique dans les travaux pratiques impliquant des nano-ordinateurs Raspberry Pi par une publication en conférence (Eusipco 2017, [115]), que l'on peut télécharger sur le lien suivant :

www.fresnel.fr/perso/marot/Documents/Selected_Publications/Eusipco_Marot_Bourennane_2017.pdf

Les huit sous-sections de la section 2.1 du chapitre 2 visent à décrire la nature, l'intensité, et le caractère innovant de l'investissement pédagogique mis en œuvre pendant une partie de ma carrière de Maître de Conférences. La section 2.2 propose un bilan et des perspectives à la fois en termes de pédagogie et de contenu ; enfin quelques images et pointeurs web sont fournis en section 2.3 pour illustrer le contenu du chapitre.

1.2.2 Introduction à mes activités de recherche

Dans ce document sont présentés mes travaux de recherche depuis une dizaine d'années. Depuis la fin de ma thèse, le fil conducteur de mes travaux réside dans ma volonté de créer des méthodes algébriques déterministes et des algorithmes d'optimisation méta-heuristiques, ceci pour estimer des paramètres dans le domaine du traitement d'image.

Quand une méthode déterministe est employée, le caractère éventuellement aléatoire du résultat d'estimation obtenu ne découle pas des propriétés de la méthode mais des propriétés des données auxquelles la méthode est appliquée. Par opposition, les méthodes méta-heuristiques incluent des tirages aléatoires de variables qui permettent de chercher intelligemment la solution d'un problème d'estimation.

Parmi les méthodes déterministes présentées dans ce rapport sont incluses des transformations du contenu de l'image en un signal, et une estimation empirique de matrices de covariance. J'inclurai également des méthodes d'optimisation locales ou globales. Celles-ci nécessitent en général des connaissances *a priori* sur la fonction à optimiser (méthode DIRECT par exemple, ou Nelder-Mead).

Les méthodes méta-heuristiques présentées dans ce rapport sont, quant à elles, essentiellement des méthodes bio-inspirées qui, pour chercher intelligemment une solution optimale à un problème de minimisation de fonction, s'inspirent du comportement des animaux.

J'ai créé ou adapté ces méthodes pour caractériser des images *via* des paramètres qu'elles permettent d'estimer. Par exemple, l'étalement d'un contour linéaire, l'amplitude ou le rythme de variation des distortions d'un contour étoilé, mais aussi les valeurs dites de 'rang' optimales pour débruiter une image au sens d'un

critère donné.

De même que lors de mes travaux de thèse, il m’a paru essentiel d’estimer de façon rigoureuse, automatisée et rapide les paramètres qui caractérisent une image ou qui permettent de l’exploiter au mieux. J’ai gardé pendant ma carrière de Maître de Conférences cette même constance dans la volonté de créer ou d’adapter des méthodes pour estimer des valeurs de paramètres, en passant par :

- la transformation du contenu d’une image en un signal ou une signature, le calcul et l’exploitation de matrices de covariance empiriques, souvent avec peu de connaissances *a priori* sur le type de contenu attendu tel la forme des contours à caractériser ;
- la minimisation d’un critère, avec des méthodes d’optimisation déterministes ou méta-heuristiques, ad hoc dans certains cas, et souvent sans connaissance *a priori* sur les propriétés du critère à minimiser telle sa dérivée.

J’ai aussi gardé une volonté forte de résoudre des problèmes pratiques issus du monde de l’industrie ou de coopérations avec des partenaires académiques, qui seront illustrés dans chaque chapitre du manuscrit.

Dans le paragraphe 1.2.2.1, j’explique quelle a été ma démarche scientifique dans le temps : comment les volets de ma recherche sont apparus, et comment j’ai pu orienter les travaux de mes collaborateurs selon le fil conducteur que je viens de citer. Cette démarche s’est traduite par la levée de plusieurs verrous, dans des contextes différents en termes de financement, de nationalité et de nature (industriel, académique) des partenaires. Notamment, j’ai amené les doctorants que j’ai encadrés à travailler sur mes sujets de prédilection que sont l’estimation paramétrique, l’optimisation, et le traitement du signal tensoriel alors qu’ils étaient financés et accueillis dans des cadres très différents. Cela est mis en exergue dans le paragraphe 1.2.2.2 qui fait une synthèse de mes activités sous forme de tableaux récapitulatifs. Dans le paragraphe 1.2.2.3, quelques laboratoires travaillant sur des sujets proches de mes travaux de recherches sont listés. Le paragraphe 1.2.2.4 annonce le plan de la synthèse.

1.2.2.1 Démarche scientifique dans le temps

Après ma thèse soutenue en 2007, j’ai effectué un Post-Doc financé par la DGA en Allemagne à l’Institut Fraunhofer IIS, suivi d’un contrat 100 % Allemand de six mois. Ma principale activité a consisté à analyser des surfaces métalliques pour y détecter des défauts. J’y ai découvert notamment la problématique de la localisation de contours flous, que j’ai explorée juste après mon post-doc. En même temps, j’ai poursuivi des travaux qui allaient dans la suite directe de ma thèse, concernant la synthèse des connaissances d’alors dans le domaine du filtrage tensoriel [133], mais aussi l’accélération de ces méthodes par l’algorithme du point fixe [111, 118].

En septembre 2009, j’ai été nommé Maître de Conférences, et ai débuté mes

travaux en tant que tel en co-encadrant Haiping Jiang, thésard financé par son pays, la Chine. Ce type de financement est très favorable à la recherche académique dans la mesure où le doctorant est à 100 % de son temps disponible en laboratoire, et n'est pas lié à une entreprise par des clauses de confidentialité. Ce n'a plus été le cas par la suite dans mes activités d'encadrement, que j'ai menées en collaboration avec des entreprises. Pour autant, leurs problématiques ont été un moteur pour motiver mes travaux de recherche. Dans le cadre de la thèse de Haiping Jiang, j'ai poursuivi mes activités de recherche concernant l'analyse d'images et la détection de contours par des méthodes inspirées du traitement d'antenne. Notamment, nous avons proposé de nouveaux modèles de signaux pour la caractérisation de contours flous [66, 67]. Ce type de problématique était alors en cours d'étude par la communauté qui a proposé un algorithme GVF (gradient vector flow) généralisé. Nous avons aussi proposé une méthode de caractérisation de contours très distordus, en adaptant un algorithme d'estimation de paramètres de multiples sinusoides amorties [68]. Haiping a soutenu sa thèse en 2011. Ses derniers travaux concernant les contours très distordus se limitaient à des contours 'étoilés', *i.e.* des contours à un pixel au plus par coordonnée d'angle dans un repaire de coordonnées polaires bien choisi. Nous avons voulu lever ce verrou et passer à des contours non étoilés lorsque j'ai commencé à encadrer Nabil Boughnim en 2012. J'ai alors commencé à orienter mes recherches vers les interfaces Homme Machine. Nous souhaitions en effet, dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Intui-Sense Technologies, envisager la faisabilité d'une interface homme machine sans contact pour la reconnaissance de gestes. Nous nous sommes concentrés sur les postures de la main. En effet, après application de plusieurs pré-traitements tels des opérateurs de morphologie mathématique, la photographie d'une main peut devenir une image binaire contenant un contour fermé, quasi-circulaire mais non-étoilé. Nous avons mis au point une signature inspirée de mes travaux de thèse et des travaux de Haiping Jiang pour distinguer 11 postures de la main [20, 21]. Nabil Boughnim a soutenu sa thèse en septembre 2013, qui avait été financée par une bourse de la Région Provence Alpes côte d'Azur, et par IntuiSense Technologies.

L'occasion m'avait été donnée en 2010 et 2011 de faire un court séjour de recherche à l'institut Fraunhofer IIS, et je souhaite que la collaboration entre l'équipe GSM de l'Institut Fresnel et l'Institut Fraunhofer IIS se poursuive. En décembre 2013 a pris fin la thèse de Moahmed Benmoussat, une co-tutelle entre GSM et IIS. Klaus Spinnler -notre partenaire IIS- et moi avons décidé de poursuivre notre collaboration par une nouvelle thèse. C'est ainsi que j'ai commencé à encadrer, en 2014, Abir Zidi, une ancienne étudiante du Master dans lequel j'enseigne et que j'ai motivée pour faire un stage en Allemagne. Notre objectif était d'étudier l'intérêt des caméras hyperspectrales et des méthodes tensorielles dans un contexte applicatif. Nous avons rapproché l'optimisation bio-inspirée et le filtrage multidimensionnel dans le domaine des ondelettes pour le débruitage de signaux multi-dimensionnels [173, 171]. Le verrou que nous avons levé dans

ce cadre-là était celui de l'estimation automatique et conjointe de valeurs de rangs associés au sous-espace signal dans le paradigme du filtrage tensoriel de multiples coefficients de transformée en ondelettes. La méthode statistique utilisée jusqu'à présent (Akaike Information Criterion) n'était pas satisfaisante. Il s'agissait à la fois d'un sujet théorique et applicatif financé par une bourse Allemande de la BFS (Bayerische Forschungsstiftung, fondation pour la recherche de Bavière). Cette thèse a été soutenue en juillet 2017. Enfin, le chef de l'équipe GSM, Salah Bourennane, et moi-même avons été contactés par IntuiSense Technologies en 2015 pour poursuivre le travail entamé sur les interfaces homme-machines : leur stagiaire ingénieur du moment, Benoit Martin, était motivé pour faire une thèse. Le verrou que nous envisagions de lever était celui de la dépendance aux paramètres des méthodes de classification utilisées pour la reconnaissance de visages. Nous avons monté un dossier afin qu'il obtienne une bourse CIFRE gérée par l'ANRT. Cette thèse comprend des aspects très appliqués liés aux systèmes embarqués pour la détection de personnes avec de fortes contraintes de temps réel [122], mais aussi des aspects très théoriques concernant les méthodes d'optimisation bio-inspirées [124]. Contrairement à Abir qui n'a fait qu'adapter la méthode bio-inspirée 'PSO' pour estimer des valeurs de paramètres, Benoit a créé une méthode entièrement nouvelle, que l'on a appelée l'algorithme du loup gris mixte (ou Mixed GWO grey wolf optimizer). Ainsi nous avons étendu notre champ d'action à un verrou supplémentaire : il n'existait pas avant nos travaux d'algorithme d'optimisation bio-inspiré mixte (et non restreint à un espace de recherche binaire). Nous avons appliqué diverses versions de cet algorithme à des problématiques de reconnaissance de genre [123], et au débruitage et démixage simultané d'images multispectrales [125]. Cette thèse a été soutenue en octobre 2018.

En parallèle avec l'encadrement des doctorants, j'ai pu faire travailler en stage ou projet de Master des groupes d'étudiants parfois nombreux, jusqu'à 9 en parallèle (20 en 2019, co-encadrés parfois par l'ATER Rania Trigui), sur des problématiques liées aux systèmes embarqués, au contrôle non destructif, aux systèmes d'acquisition de de traitement d'images en général. Quasiment à chaque fois je mets les étudiants en relation directe avec une entreprise et sa problématique (Mermec et l'imagerie spectrale, Fraunhofer IIS et les systèmes d'illumination, IntuiSense Technology et les distributeurs automatiques), ou je me base sur le travail réalisé en coopération avec une entreprise (une interface graphique de Matole SAS et Détect Réseaux). Lorsque ce n'est pas une entreprise qui est concernée par le sujet que je propose, je mets en relation mes étudiants avec des chercheurs du laboratoire : par exemple Sébastien Guenneau et Ronald Aznavourian de l'équipe Epsilon à l'Institut Fresnel sur des sujets liés au morphing implanté en Python sur Raspberry, Anabela DaSilva de Mosaic pour des sujets liés à la polarisation, ou un de mes doctorants, pour des sujets liés au traitement d'image pur.

Enfin j'ai encadré jusqu'à fin septembre le Post-Doctorant Paul Lauga dans le

cadre d'un projet FUI (scanvision) lié à la détection d'objets par imagerie radar. Dans ce cadre-là, nous avons coopéré avec les entreprises BOWEN ERTE de Saclay et VSM d'Istres, ainsi qu'avec le laboratoire Niçois LEAT.

1.2.2.2 Tableaux récapitulatifs de mes activités de recherche

Les tableaux récapitulatif 1.6, 1.7, 1.8, et 1.9 résument les différents volets de mes activités de recherche par thématique. Par volet j'entends les verrous que j'ai voulu lever sur une thématique donnée, le contexte notamment les sources de financement des thèses que j'ai encadrées, les étudiants de Master éventuellement impliqués, les collaborations industrielles ou académiques, et les publications les plus représentatives.

Ces tableaux sont bien sûr simplificateurs : Nabil Bougnim a pu par exemple mettre en oeuvre des méthodes de détection de contours préalablement à ses calculs de signature pour estimer les postures de la main. Par ailleurs, Abir Zidi a utilisé des méthodes d'optimisation bio-inspirées pour estimer des valeurs de rang, sans toutefois en créer d'entièrement nouvelles comme a pu le faire Benoit Martin. Ce dernier a conçu une méthode d'optimisation bio-inspirée, et l'a appliquée, sans que ce ne soit le coeur de son travail, à l'estimation de paramètres en imagerie multidimensionnelle. Ainsi, je mets pour chaque 'Sujet' correspondant à un tableau le nom d'un doctorant entre parenthèses lorsqu'il s'est agi pour lui d'un sujet secondaire.

Ces tableaux montrent cependant bien qu'il existe une démarche logique dans mes méthodologies de recherche : les doctorants que j'ai encadrés ont tous travaillé sur des thématiques qui sont au coeur de mes activités de recherche. De ce fait, il existe une certaine continuité dans les sujets que j'ai abordés avec eux.

Volet \ Sujet	Contours
Verrou Contexte, financement Doctorants Collaboration industrielle Publications	Contours flous ou très distordus, temps de calcul Post-Doc DGA, académique Chinois Haiping Jiang, (Nabil Bougnim) Fraunhofer IIS Conférence [103, 117, 66] Revue [67, 68]

Table 1.6 – Détection de contours

Volet \ Sujet	IHM
Verrou Contexte, financement Doctorants Stagiaires M2 Collaboration industrielle Publications	Temps réel CIFRE/Région Nabil Boughnim, Benoit Martin Xavier Daïni, Damien Alberola IntuiSense, Matole Conférence [20, 122] Revue [21]

Table 1.7 – Interfaces Homme Machine

Volet \ Sujet	Optimisation bio-inspirée
Verrou Contexte, financement Doctorants Collaboration industrielle Publications	Dépendance aux paramètres continus et discrets CIFRE Benoit Martin, (Abir Zidi) IntuiSense Conférence [113, 123, 124] Revue [125]

Table 1.8 – Optimisation bio-inspirée

Volet \ Sujet	Tenseurs, imagerie spectrale
Verrou Contexte, financement Doctorants Stagiaires M2 Collaboration industrielle Publications	Estimation conjointe de paramètres BFS Allemande Abir Zidi, (Benoit Martin) Fadhila Moussouni, Christophe Froche, Noura Neji Fraunhofer IIS, Mermec Conférence [90, 102, 114, 171, 175] Revue [133, 118, 173]

Table 1.9 – Traitement du signal tensoriel

1.2.2.3 Positionnement

S'il est difficile de faire une liste exhaustive de tous les laboratoires travaillant sur les sujets abordés dans ce manuscrit, on peut néanmoins en citer quelques-uns :

Les méthodes de segmentation et de détection de contours sont par exemple

considérées au LTCI à Paris (morphologie mathématique floue), au CREATIS à Lyon et au LTSI à Rennes pour des applications médicales ; à l'Institut Fraunhofer IIS à Nuremberg pour des applications industrielles. Au département Electrical Engineering à Stanford ont été initiées les méthodes de segmentation par le formalisme des antennes virtuelles ; ce département fait désormais sa recherche dans le domaine des interactions homme-machines par systèmes de vision. Le suivi de personnes, la reconnaissance d'objets en temps réel est considérée à Tampere university of Technology, Telecom Paris Tech, Télécom Sud Paris, et par les laboratoires de ST Microelectronics.

Les initiateurs de l'optimisation bio-inspirée appartenaient à la University of North Carolina, où la méthode PSO a été inventée. L'optimisation bio-inspirée a été promue en France par Maurice Clerc (France Télécom). Les chercheurs publiant dans le domaine actuellement sont notamment à l'université de Griffith à Brisbane en Australie, à Selçuk University en Turquie. En France le biomimétisme est considéré pour des applications plutôt en robotique, à l'ISM à Marseille ou au LIRMM à Montpellier ; le LCOMS en Lorraine travaille sur des méthodes d'optimisation, sans forcément se concentrer sur le bio-inspiré et à visée plutôt applicative pour les systèmes embarqués ; le LEAT travaille sur des architectures bio-inspirées de type réseaux de neurones ; au laboratoire d'informatique fondamentale de Lille a été abordée l'optimisation multi-objectif par la combinaison d'heuristiques. Le LISSI à Créteil travaille sur le bio-inspiré, pour la robotique mais aussi pour l'optimisation appliquée à l'image.

Le GdR GDR MACS (modélisation, analyse, et conduite des systèmes dynamiques) inclut un groupe de travail nommé META (Métaheuristiques : Théorie et Applications). Ce groupe semble focalisé sur les applications en systèmes dynamiques et en automatique (plutôt que sur les applications en traitement du signal et des images).

Le traitement des données tensorielles est un des sujets de recherche du GIPSA LAB à Grenoble, du LIS (LSEET) à Toulon, d'IS à Nice, mais aussi dans le laboratoire Skoltech en Russie. L'université du Minnesota est aussi active dans le domaine, plutôt pour des applications en télécommunications ; ainsi que l'université KU de Louvain en Belgique. Le traitement des images hyperspectrales est un thème abordé au laboratoire IRIT de Toulouse notamment par des méthodes Bayésiennes.

Enfin à l'Institut Fresnel, dont fait partie mon équipe, GSM (Groupe Signaux Multidimensionnels), voici le contexte dans lequel je développe mes activités :

Au sein du thème 'traitement de l'information et ondes aléatoires' j'ai contribué aux sujets suivants : 'l'imagerie hyperspectrale' (suite notamment à l'achat d'une caméra hyperspectrale par l'équipe GSM), et la 'biométrie et la reconnaissance de gestes' au sens large, *via* l'intégration de méthodes de détection dans des systèmes de vision. A partir de 2014 environ j'ai aussi souhaité développer une nouvelle activité autour de méthodes d'optimisation bio-inspirées. Bien que de

nombreuses variantes aient été proposées, les méthodes mixtes semblaient rares. En France en particulier, les méthodes 'neuro-inspirées' sont un sujet de prédilection, mais pas forcément les méthodes d'optimisation méta-heuristiques.

1.2.2.4 Synthèse des activités de recherche : ordonnancement

C'est par grandes thématiques que la synthèse est organisée. Pour résumer la section courante et présenter les chapitres qui suivent dans ce manuscrit : après ma thèse présentée succinctement au Chapitre 3, la thèse de Haiping Jiang en est la suite directe. Les travaux en relation avec la thèse de Haiping et l'application considérée pendant mon Post-Doc sont présentés au Chapitre 4. Les techniques créées avec Haiping pour les contours très distordus ont été reprises par Nabil Boughnim pour une application de reconnaissance de postures de la main. Les travaux de Nabil ont été un prélude à ma collaboration avec IntuiSense Technologies, qui m'a ensuite contacté pour continuer dans la direction des interfaces homme machine avec Benoit Martin. Ce volet des travaux de Benoit, plus aboutis que ceux de Nabil en termes d'intégration, sont présentés dans le Chapitre 5, après ceux de Nabil. L'autre volet des travaux de Benoit porte sur les méthodes d'optimisation bio-inspirées : nous en avons créé une nouvelle, inspirée des dernières avancées dans le domaine de l'optimisation méta-heuristique : le GWO mixte. Pour montrer que c'est une méthode très générale, nous l'avons appliquée à une problématique de reconnaissance de visages (proposée par IntuiSense), et à une problématique liée à l'imagerie multispectrale. Ces travaux sont présentés dans le Chapitre 6. Dans le même temps, souhaitant poursuivre ma collaboration avec l'Institut Fraunhofer IIS, j'ai motivé Abir Zidi pour faire un stage de Master puis une thèse en Allemagne. Ses travaux ont eux aussi fait une part à l'optimisation bio-inspirée, adaptés en tant qu'outil pour l'estimation automatique de valeurs de rangs dans des algorithmes de débruitage par transformée en paquets d'ondelettes et filtrage de Wiener multidimensionnel. Ils sont présentés au Chapitre 7.

1.2.2.5 Notations

Ce manuscrit propose des notations unifiées pour les travaux que j'ai pu effectuer dans les différents domaines cités plus haut. Elles sont valables pour toute la suite du manuscrit.

Nomenclature

Notations de base

a ou A	scalaires
\mathbf{a}	vecteurs
\mathbf{A}	matrices
\mathcal{A}	tenseurs
\mathbb{A}	ensembles

Nomenclature

Traitement du Signal Tensoriel

l_1	Nombre de lignes
l_2	Nombre de colonnes
l_3	Nombre de bandes
\mathbb{R}	Ensemble des réels
$\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{l_1 \times \dots \times l_3}$	Tenseur d'ordre 3
$a_{i_1 i_2 i_3}$	Élément de \mathcal{A}
\mathcal{X}	Tenseur pur
\mathcal{R}	Tenseur bruité
$\hat{\mathcal{X}}$	Tenseur estimé
\times_n	n -mode produit

Nomenclature

Optimisation

Paramètres communs : tous les problèmes, toutes les méthodes

N	Nombre de paramètres à estimer
i	Indice de paramètre à estimer, $i = 1, \dots, N$
K_i	Paramètre à estimer d'indice i
$f(\cdot)$	Fonction objectif, appelée également critère à minimiser
$iter$	Itération courante
T_{max}	Nombre maximum d'itérations
Q	Nombre d'agents de recherche (particules, loups, ...)
$\mathbf{x}_q^k(iter)$	Position du $q^{ème}$ agent, $q = 1, \dots, Q$
\hat{K}_i	$i^{ème}$ paramètre : valeur estimée

Nomenclature

Optimisation du Loup Gris

Paramètres généraux

a	Distingueur de phase
η	Renforceur de phase
$\mathbf{x}_\alpha^k, \mathbf{x}_\beta^k, \mathbf{x}_\delta^k$	Positions des leaders α, β et δ
$\mathbf{x}_{\rho1}^k, \mathbf{x}_{\rho2}^k$	Positions des loups aléatoires $\rho1$ and $\rho2$

Algorithme du Loup Gris Discret

H_i	Nombre de valeurs candidates pour le paramètre K_i
\mathbf{d}_i^{val}	Valeurs candidates pour le paramètre K_i : $[K_i^1, \dots, K_i^{h_i}, \dots, K_i^{H_i}]^T$
\mathbf{d}_i^{ind}	Indices de chaque valeur candidate pour K_i : $[1, \dots, h_i, \dots, H_i]^T$
$\mathbf{h}_q(iter)$	Vecteur d'indices associé au loup $\mathbf{x}_q^k(iter)$
$\mathbf{h}_\alpha, \mathbf{h}_\beta, \mathbf{h}_\delta$	Vecteurs d'indices associé aux loups leaders α, β , et δ
l	Leader sélectionné : $\alpha, \beta, \delta, \rho1$ or $\rho2$
Δ	Facteur de déplacement

Algorithme du Loup Gris Continu

y_i^l	Contribution d'un leader l au paramètre K_i
---------	---

1.3 Liste de publications

Mes travaux de recherche ont donné lieu à la publication de :
16 articles publiés dans des revues internationales avec comité de lecture,
28 articles publiés dans des conférences internationales avec comité de lecture,
1 chapitre de livre.

1.3.1 Revues internationales

Issues des travaux de MCF

- R16 B. Martin, **J. Marot**, and S. Bourennane, "Mixed grey wolf optimizer for the joint denoising and unmixing of multispectral images", *Applied Soft Computing*, accepted October 15, 2018. [125]
doi : 10.1016/j.asoc.2018.10.019
- R15 A. Zidi, **J. Marot**, S. Bourennane, and K. Spinnler, "Bio-Inspired Optimization Algorithms for Automatic Estimation of Multiple Subspace Dimensions in a Tensor-Wavelet Denoising Algorithm", *Journal of Remote Sensing Technology*, vol. 4, Issue 1, pp. 90-114, December 2016. [173]
doi : 10.18005/JRST0401008
- R14 N. Boughnim, **J. Marot**, C. Fossati and S. Bourennane, "Hand posture recognition using jointly optical flow and dimensionality reduction", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, November 2013, 2013 :167. [21]
doi : 10.1186/1687-6180-2013-167
- R13 H. Jiang, **J. Marot**, C. Fossati, and S. Bourennane, "Strongly concave star-shaped contour characterization by algebra tools", *Elsevier Signal Processing*, vol. 92, pp. 1567-1579, January 2012. [68]
doi :10.1016/j.sigpro.2011.10.002
- R12 H. Jiang, **J. Marot**, C. Fossati, and S. Bourennane, "Circular contour retrieval in real-world conditions by higher order statistics and an alternating-least squares algorithm", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2011, 2011 :112 (23 November 2011) [67]
doi :10.1186/1687-6180-2011-112
- R11 S. Bourennane, C. Fossati, **J. Marot**, "Contour Estimation in Image Using Virtual Signal", *optical engineering*, Opt. Eng. 49(5), 057002 (May 11, 2010). [27]
doi :10.1117/1.3421576
- R10 S. Bourennane, C. Fossati, and **J. Marot**, "Localization of narrow-band sources in unknown spatially correlated noise," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, Article ID 732591, 11 pages, april 2010. [28]
doi :10.1155/2010/732591

- (Editorial Board) S. Bourennane, **J. Marot**, C. Fossati, A. Bouridane, and K. Spinnler, "Special Issue : Multidimensional Signal Processing and Applications", Guest Editors : Salah Bourennane, Julien Marot, Caroline Fossati, Ahmed Bouridane, and Klaus Spinnler, *The Scientific World Journal*, Article ID 365126, Hindawi, 2014.

Issues des travaux de Post-Doctorat

- R9 **J. Marot**, C. Fossati, and S. Bourennane, "About advances in tensor data denoising methods", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Volume 2008, Article ID 235357, 12 pages. [118]
doi :10.1155/2008/235357.
- R8 S. Bourennane, C. Fossati, and **J. Marot**, "About Noneigenvector Source Localization Methods," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008, Article ID 480835, 13 pages, 2008. [23]
doi :10.1155/2008/480835.

Issues des travaux de thèse

- R7 D. Muti, S. Bourennane and **J. Marot**, "Lower-Rank Tensor Approximation and Multiway Filtering", *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications (SIMAX)*, vol. 30, no. 3, pp. 1172-1204, september 25 2008. [133]
doi : 10.1137/060653263.
- R6 **J. Marot** and S. Bourennane, "Propagator method for an application to contour estimation", *Pattern recognition letters*, vol. 28, no. 12, pp. 1556-1562, sept. 2007. [99]
doi :10.1016/j.patrec.2007.03.013.
- R5 **J. Marot** and S. Bourennane, "Phase Distortion Estimation by DIRECT and spline interpolation algorithms", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 14, no. 7, pp. 461-464, July 2007. [108]
doi : 10.1109/LSP.2006.891317.
- R4 **J. Marot** and S. Bourennane, "Array processing and fast Optimization Algorithms for Distorted Circular Contour Retrieval", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Volume 2007, Article ID 57354, 13 pages. [107]
doi :10.1155/2007/57354.
- R3 **J. Marot** and S. Bourennane, "Subspace-Based and DIRECT Algorithms for Distorted Circular Contour Estimation", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 16, no. 9, pp. 2369-2378, sept. 2007. [109]
doi : 10.1109/TIP.2007.903907.
- R2 S. Bourennane and **J. Marot**, "Contour estimation by array processing methods", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Volume 2006 (2006), Article ID 95634, 15 pages. [31]

doi :10.1155/ASP/2006/95634.

- R1 S. Bourennane and **J. Marot**, "Estimation of straight line offsets by a high-resolution method", *IEE Proceedings Vision Image and Signal Processing*, vol. 153, no. 2, pp. 224-229, April 6, 2006. [26]
doi : 10.1049/ip-vis :20050149.

1.3.2 Conférences internationales avec comité de lecture

Issues des travaux de MCF

- C28 **J. Marot**, " Adaptive mixed grey wolf optimizer : toolbox for illustration and comparative study", *SPARS 2019*, accepted May 2019. [106]
- C27 C. Migliaccio, L. Brochier, J. Lantéri, P. Lauga, **J. Marot** and B. Cosson, " MMW Imaging using polarimetric measurements", *EUMW 2019*, accepted April 2019. [127]
- C26 B. Martin, **J. Marot** and S. Bourennane, " Improved discrete grey wolf optimizer ", *EUSIPCO 2018*, Rome, Italy, September 2018. [124]
- C25 B. Martin, **J. Marot** and S. Bourennane, " Real-time face detection and tracking for vending machine data management ", *GRETSI 2017*, Juan Les Pins, September 2017. [122]
- C24 B. Martin, **J. Marot** and S. Bourennane, " Reconnaissance de genre optimisée par GWO adaptatif", *GRETSI 2017*, Juan Les Pins, September 2017. [123]
- C23 **J. Marot** and S. Bourennane, " Raspberry Pi for Image Processing Education ", *EUSIPCO'17*, pp. 2428-2432, Kos, Greece, Augst 26- September 1, 2017. [115]
ISBN 978-0-9928626-7-1
- C22 A. Zidi, K. Spinnler, **J. Marot**, and S. Bourennane, (2016, October). Multispectral image denoising in wavelet domain with unsupervised tensor subspace-based method. In *Visual Information Processing (EUVIP)*, 2016 6th European Workshop on (pp. 1-6). IEEE [175].
doi : 10.1109/EUVIP.2016.7764599
- C21 A. Zidi and **J. Marot** and S. Bourennane and K. Spinnler, "Automatic rank estimation of Parafac decomposition and application to multispectral image wavelet denoising" In : *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Conf. ICIP 2016*, Phoenix, USA, September, 2016. Proceedings. p. 3101-3105. [171]
doi : 10.1109/ICIP.2016.7532930
- C20 **J. Marot**, and Salah Bourennane, "Improvement of a Wavelet-Tensor Denoising Algorithm by Automatic Rank Estimation" In : Battiato S et al. *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems : 16th Int. Conf. ACIVS 2015*, Catania, Italy, October 26-29, 2015. Proceedings. Cham : Springer International Publishing ; 2015. p. 779-790. [114]

- doi : 10.1007/978-3-319-25903-1 67
- C19 A. Zidi, **J. Marot**, K. Spinnler, and S. Bourennane (2015), "Unmixing of Hyperspectral Images with Pure Prior Spectral Pixels", In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, VISAPP'15*, ISBN 978-989-758-089-5, pages 153-158. [174]
doi : 10.5220/0005311101530158
 - C18 A. Zidi, J. Juan, **J. Marot**, and S. Bourennane, "Nonnegative matrix factorization with spatial prior and reference spectra application to remote hyperspectral image understanding", *Visual Information Processing (EUVIP)*, 2014 5th European Workshop on , (EUVIP'14), pp. 1-6, December 10-12 2014.[172]
DOI : 10.1109/EUVIP.2014.7018397
 - C17 **J. Marot**, S. Bourennane, "Recent advances on tensor models and their relevance for multidimensional data processing," *Signals, Systems and Computers, 2014 48th Asilomar Conference on*, vol., no., pp.586,590, 2-5 Nov. 2014. [102]
doi : 10.1109/ACSSC.2014.7094513 (Invitation)
 - C16 **J. Marot** and S. Bourennane, "Particle Swarm Optimization For Blurred Contour Retrieval ", *EUSIPCO'14*, pp. 810-814, Lisbon, September 2-5 2014. [113]
INSPEC : 14775521
 - C15 T. Lin, **J. Marot**, and S. Bourennane, " Small Target Detection Improvement in Hyperspectral Image ", *ACIVS'13*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8192, pp. 460-469, October 2013. [90]
Doi : 10.1007/978-3-319-02895-8 41
 - C14 **J. Marot** and Salah Bourennane, "Leaf marker spectra identification by hyperspectral image acquisition and vertex component analysis", *EUVIP'13*, pp. 190-195, June 2013. [112]
ISBN : 978-82-93269-13-7
 - C13 Nabil Boughnim, **J. Marot**, Caroline Fossati, Salah Bourennane, and Frédéric Guérault, " Fast and improved hand classification using dimensionality reduction and test set reduction ", *ICASSP'13*, pp. 1971-1975, May 2013. [20]
doi : 10.1109/ICASSP.2013.6637998
 - C12 Nabil Boughnim, **J. Marot**, Caroline Fossati, and Salah Bourennane, " Hand Posture Classification by Means of a New Contour Signature", *ACIVS'12*, pp. 384-394, September 2012. [19]
doi : 10.1007/978-3-642-33140-4 34.
 - C11 Haiping Jiang, **J. Marot**, Caroline Fossati, and Salah Bourennane, " Fuzzy triangle contour characterization by subspace based methods of array processing ", *SAM'10*, pp. 165–168, October 2010. [65]
doi : 10.1109/SAM.2010.5606727
 - C9 Haiping Jiang, **J. Marot**, Caroline Fossati, and Salah Bourennane, "

Fuzzy contour characterization by subspace based methods of array processing and DIRECT method ", *EUSIPCO'10*, pp. 1344 – 1348, Aalborg, August 23-27 2010. [66]

- C8 **J. Marot**, Caroline Fossati, and Salah Bourennane, "Fast Subspace Based Tensor Data Filtering ", *ICIP'09*, pp. 3869-3872, novembre 2009. [120]
doi : 10.1109/ICIP.2009.5414048.

Issues des travaux de Post-Doctorat

- C10 **J. Marot**, Salah Bourennane, and Klaus Spinnler, "Metal Surface Control System Based on Successive Contour Estimation", *ICIP'10*, pp. 2293-2296, September 2010. [117]
doi : 10.1109/ICIP.2010.5654115
- C7 **J. Marot**, Y. Caulier, A. Kuleschov, K. Spinnler, and S. Bourennane, "Contour Detection for Industrial Image Processing by Means of Level Set Methods", Proceedings of *ACIVS'08*. [103]
doi :10.1007/978-3-540-88458-3 59
- C6 **J. Marot**, S. Bourennane, "Array processing for intersecting circle retrieval". In : *Signal Processing Conference, 2008 16th European (EUSIPCO'08)* ; 2008. p. 1–5. [101]
- C5 **J. Marot**, C. Fossati, and S. Bourennane, "Fast subspace-based source localization methods", *IEEE SAM' 08 Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, pp. 203-206, July 2008. [119]
doi : 10.1109/SAM.2008.4606855
- C4 **J. Marot** and S. Bourennane, "Fast tensor signal filtering using fixed point algorithm", *IEEE ICASSP'08*, pp. 921-924, Apr. 2008. [111]
doi : 10.1109/ICASSP.2008.4517761.

Issues des travaux de thèse

- C3 **J. Marot**, S. Bourennane, and Mouloud Adel, "Array processing approach for object segmentation in images", *IEEE ICASSP'07*, Vol. 1, pp. 621-624, Apr. 2007. [116]
doi : 10.1109/ICASSP.2007.365984
- C2 S. Bourennane and **J. Marot**, "Optimization and interpolation for distorted contour estimation", *IEEE ICASSP'06*, Vol. 2, pp. 717-20, Apr. 2006. [32]
doi : 10.1109/ICASSP.2006.1660443
- C1 S. Bourennane and **J. Marot**, "Line parameters estimation by array processing methods", *IEEE ICASSP'05*, Vol. 4, pp. iv/965- iv/ 968, Mar. 2005. [29]
doi : 10.1109/ICASSP.2005.1416171

1.3.3 Chapitre de livre

- B1 **J. Marot**, Caroline Fossati, Yannick Caulier, "About array processing methods for image segmentation", *Recent Advances in Signal Processing*, edited by Ashraf A. Zaher, INTECH, Pp 15-36, november 2009. [[121](#)]. ISBN 978-953-307-002-5.

2 Synthèse des activités d'enseignement

2.1 Enseignements en termes de compétences pédagogiques

2.1.1 Concevoir un enseignement

En ce qui concerne la conception de nouveaux enseignements, j'insisterai en particulier sur mes enseignements d'informatique industrielle en L2 SPI et en L3 SPI AGE.

Définir des objectifs en termes de connaissances et de compétences

Dans le cadre de l'approche par compétences, j'ai défini avec mes collègues de l'équipe pédagogique et de l'équipe de portage SPI les compétences que l'on attend d'un étudiant en sortie de SPI, en particulier de L3 SPI EEA. A mon sens les premiers enjeux lorsque l'on monte un enseignement concernent les supports et applications que l'on se donne pour objectif de faire découvrir aux étudiants. Cela implique l'achat de matériel, et la formation des jeunes enseignants-chercheurs vacataires tels les ATER, principalement pour créer des travaux pratiques attractifs mais aussi pour créer du lien entre les concepts vus en CM et les outils et maquettes vus en TP.

Mes activités d'enseignement ont clairement pour but d'atteindre la compétence spécifique au parcours EEA de la Licence SPI : "Concevoir des systèmes automatisés de commande, de traitement de l'information, et de conversion de l'énergie électrique dans une approche pluri-technologique".

Pour l'informatique industrielle en L2, les commandes de matériel ont permis de mettre à disposition des étudiants du matériel identique à Saint-Jérôme et à Aix-Montperrin. Une somme de 2200 euros a été dépensée en 2015 par le département Informatique et Interactions pour cela, à savoir des kits microchip de programmation de microcontrôleurs, et des interfaces de transfert. Je me suis donné comme contrainte le fait de travailler avec un logiciel libre et des maquettes de petite taille pouvant être stockées sur tout site d'AMU où cela s'avérerait nécessaire.

Depuis 2012 j'ai formé un ATER tous les un ou deux ans sur ces enseignements d'informatique industrielle : Imène Garali, Mohamed Jaballah, Zouhair Haddi, Rania Trigui.

Pour la matière 'Etude des systèmes échantillonnés' en L3, dont j'ai la responsabilité des travaux pratiques, j'ai conçu des TPs sur nano-ordinateurs Raspberry Pi. L'objectif était de développer les compétences des étudiants en programmation et échange de données, avec des TPs collaboratifs. Ces travaux pratiques ont donné lieu à la publication de l'article pédagogique mentionné plus haut [115]. Pour cette matière j'ai formé des doctorants vacataires (Mustapha Niane, Xavier Barral), pour faire travailler les étudiants sur des maquettes un peu plus faciles d'accès : des nano-ordinateurs Arduino associés à de petits moteurs à courant continu afin que les étudiants de L3 SPI aient une ouverture sur des systèmes comprenant une partie opérative et sur un autre type de nano-ordinateur. Cette

facette des TPs est moins innovante que celle consacrée au Raspberry Pi car le matériel et les programmes sont fournis clé en main par le fabricant (Sigma 3). J'utilise Ametice pour cet enseignement, afin que les étudiants puissent déposer leurs comptes-rendus..

Prendre en compte le contexte de la formation et la diversité du public et de ses acquis

En L3 SPI AGE, les étudiants sont issus de divers horizons : L2 SPI, BTS électrotechnique, IUT GEII, formations à l'étranger. De ce fait, il existe des enseignements de remise à niveau qui permettent de prendre en compte ce contexte particulier. Je me suis investi dans des enseignements de remise à niveau en mathématiques, et en informatique industrielle (pour bien les préparer à l'UE 'Automatismes et informatique industrielle'). En Master Images et Système, la situation est similaire, avec des étudiants issus d'horizons divers. Nous mettons en œuvre une UE d'homogénéisation qui consiste en une remise à niveau dans différents logiciels. De tels enseignements d' "homogénéisation" ne me semblent pas nécessaire en L2 SPI pour mes enseignements d'informatique industrielle : les étudiants sont en très grande majorité issus de la L1 SPI.

Structurer le contenu d'enseignement

Par ailleurs je m'efforce de structurer mes CMs, TDs, TPs, avec une démarche orientée TP : les CM permettent aux étudiants d'avoir du recul et de connaître les définitions de base, les TDs permettent de manipuler les concepts vus en CM, avec applications numériques là où cela s'avère pertinent, mais surtout de préparer le TP et de comprendre les manipulations que les étudiants devront réaliser de la façon la plus autonome possible pendant les séances. Sachant que leur investissement en CM et TD sera très utile en TP, l'étudiant est ainsi plus actif, attentif, et curieux.

J'ai créé un site web à l'intention des étudiants (mais aussi des ATER), dédié à ces travaux pratiques :

<https://sites.google.com/site/infoindusamu/home>

Planifier des activités et des séquences d'enseignement

De façon très pragmatique, j'ai diffusé à la fin de l'année 17-18 des 'fiches UEs' formatées par des secrétaires pédagogiques d'Aix-Montperrin et Saint-Jérôme, pour planifier intelligemment les séquences d'enseignement, et répartir harmonieusement les services des ATER (en TP) et mes interventions. En relation avec l'équipe de portage SPI, j'ai décidé de commencer mes enseignements d'informatique industrielle après que les enseignements d'électronique numérique aient été bien engagés, car ils constituent à nos yeux l'un des pré-requis de l'informatique industrielle.

2.1.2 Utiliser les différentes Technologies de l'Information et de la Communication

Utiliser les outils multimedia

D'une part j'utilise divers outils multimédia pour mettre à la disposition des mes étudiants certains documents, d'autre part je les amène à découvrir ou à concevoir des outils numériques puisque ceux-ci font partie naturellement des enseignements que l'on dispense dans le département Informatique et Interactions. Voici la façon dont j'utilise les outils existants :

Dans le cadre des mes enseignements, notamment en projet, j'utilise les outils mis à disposition par AMU, tels AMUBox et FileZ pour le stockage et le transfert de fichier.

L'application Ametice est utilisée par mes étudiants pour déposer leurs compte-rendus de travaux pratiques, par exemple pour la matière 'Étude des systèmes échantillonnés' en L3 SPI. Par le biais de mon site internet je mets à la disposition des étudiants les documents de cours, TD, TP, les annales, et des liens vers des sources documentaires scientifiques (sciencedirect, Google Scholar, HAL, etc...). : <http://www.fresnel.fr/perso/marot/Documents/BookmarksSciences.html>

Produire des supports pédagogiques adaptés, savoir interagir à distance

Les outils numériques dont je fais une promotion particulière auprès des étudiants sont les outils numériques collaboratifs :

Premièrement en projet de Master, mes étudiants rédigent leur compte-rendu sur overleaf

https://www.overleaf.com/users/sign_in.

Overleaf est, comme l'outil mis en place par le CNRS PLMLatex (<https://plmlatex.math.cnrs.fr>), une plateforme collaborative de rédaction Latex en ligne. Non seulement les étudiants apprennent à rédiger en Latex ce qui est important pour eux s'ils veulent écrire des articles scientifiques dans leur carrière professionnelle, mais en plus c'est un outil collaboratif qui permet à plusieurs personnes d'écrire simultanément sur des postes éloignées les uns des autres, et à tout moment.

Cela contribue de façon très concrète à leur faire découvrir le monde de la recherche et les méthodes de travail des chercheurs qui sont toujours impliqués dans des collaborations à distance avec une nécessité croissante d'outils collaboratifs.

Deuxièmement, l'utilisation de ces outils est même devenue une nécessité absolue lorsque deux de mes étudiants en stage de Master ont fait un séjour dans un laboratoire à l'étranger. Mes bons rapports avec mes collègues de l'Institut Fraunhofer IIS en Allemagne m'ont permis en effet d'organiser un séjour d'environ un mois pour Abir Zidi et Christophe Froche (étudiants en Master 2 Images et Systèmes à Saint-Jérôme). Cette découverte du monde de la recherche appliquée s'est même poursuivie, pour Abir Zidi, par une thèse en co-tutelle entre l'école

doctorale 'Physique et Sciences de la matière' d'AMU et l'institut Fraunhofer IIS, financée par et effectuée en Allemagne.

Troisièmement, je dois mentionner, puisque j'appartiens au département Informatique et Interactions, les méthodologies que j'ai pu mettre en œuvre avec ou pour les étudiants pour leur présenter divers outils d'échange de données numériques :

En 'Automatismes et Informatique Industrielle' en L3 SPI, de nombreuses séances de TP sont fondées sur l'échange d'information entre systèmes informatiques et parties opératives : Avec mon collègue Thibaut Raharijaona et un technicien Jean-Jacques Honorine, nous avons créé (en 2011-2012) des maquettes de domotique intégrant un automate programmable de type Crouzet, qui coordonne la transmission de données (de type température) depuis la maquette vers des ordinateurs, en utilisant le réseau local Ethernet. Pour des TPs Raspberry mentionnés en section précédente, j'ai étendu à partir de 2016 ces protocoles de transfert de données à tout fichier, sur des supports de type Raspberry Pi, toujours via câble Ethernet.

En projet de M2 Images et Systèmes, j'ai proposé d'étendre le protocole de communication à du WiFi, entre un Raspberry Pi et un PC portable (projet réalisé par Alaa GAIED et Hongcheng Liao, "Traitement d'images embarqué sur Raspberry Pi", janvier-février 2017).

2.1.3 Transmettre des savoirs universitaires

La transmission des savoirs et l'acquisition de compétences par mes étudiants est bien sûr au cœur de mes activités d'enseignant.

Ajuster ses activités et ses séquences d'enseignement en fonction des situations et des publics

Les deux sections précédentes ont pu donner un bon aperçu du contenu de mes enseignements dans les matières dont j'ai été responsable ces dernières années, et des savoirs que je souhaite transmettre. Ces enseignements ont été évalués, les enquêtes retournées par l'observatoire de la vie étudiante (OVE) sont fournies en annexe : Informatique industrielle à Aix et St-Jérôme en 2015, et en 2018 ; Etude des systèmes échantillonnés en 2018, Automatismes et Informatique industrielle en 2018. Ces enquêtes m'ont permis de faire évoluer mes enseignements en fonction des retours de mon public.

Voici ce qui ressort de ces évaluations :

Entre 2015 et 2018 on note une amélioration des évaluations données par les étudiants de Saint Jérôme. J'ai pris soin de prendre en compte leurs commentaires concernant surtout les bases à donner en langage assembleur avant d'aller plus loin dans le cours. On note qu'en 2018, c'est surtout le manque de matériel qui ressort comme difficulté. En 2018 j'ai pris la responsabilité et un grand nombre d'heures en Automatismes et Informatique industrielle en L3 SPI AGE.

L'enquête de satisfaction montre que les étudiants sont satisfaits, avec un bémol pour les critères suivants :

i) "Le temps alloué à la réalisation du TP est suffisant pour atteindre les objectifs fixés ?"

ii) "Vos connaissances antérieures sont suffisantes pour aborder sans difficulté les notions présentées dans cet enseignement"

Pour le deuxième item, ce bémol vient du fait que la proportion d'étudiants venant de L2 SPI est relativement faible en L3 SPI EEA. On palie cela en insérant un enseignement de mise à niveau en début d'année qui inclut l'informatique industrielle vue en L2. L'enquête concernant la matière Etude des systèmes échantillonnés en L3 SPI AGE montre que les étudiants apprécient les TP (dont je suis responsable), qui leur permettent de mettre en œuvre un travail de groupe. J'en veux pour preuve le bon score obtenu (3.3) sur l'item suivant : "Cet enseignement vous permet de consolider votre capacité à travailler en groupe". J'en retire une certaine satisfaction car les étudiants font certainement référence aux TPs Raspberry Pi, que je considère comme étant les plus innovants parmi les TP que j'ai pu monter ces dernières années.

Guider les étudiants dans l'acquisition de connaissances et de compétences professionnalisantes, faire appel à diverses formes d'expression orale et/ou écrite, favoriser l'apprentissage de compétences transversales

La transmission des savoirs universitaires consiste aussi à rapprocher les étudiants du monde académique, et du monde industriel, afin qu'ils prennent conscience des besoins de ces deux domaines et qu'ils donnent l'importance qu'ils méritent aux enseignements que nous leur prodignons. Les projets suscitent de mon point de vue fortement la curiosité et l'esprit critique des étudiants. J'encourage mes étudiants à se rapprocher du monde académique, par exemple via des projets orientés vers la recherche et la conception de nouveaux enseignements :

1. Rémi Campo, Melvyn Doumas, "Comparaison des algorithmes PSO et GWO", janvier-mai 2017, M1
2. Hadrien Blanc, Maxime Traverse, "Interface de traitement d'images multispectrales", janvier-mai 2017, M1
3. Masouibou Sitti, Alexandre Darmon, Lucas Sirerol, Florian Viola, "Morphing sur Raspberry Pi", janvier-mai 2017, M1
4. Reymond Matthieu, Albertengo Alban, "Détection de visage avec OpenCV sur Raspberry Pi", juin 2016, L2 CMI

Les projets liés au monde industriel doivent bien sûr faire partie de la formation en Master, et permettent de guider les étudiants dans l'acquisition de compétences professionnalisantes. Je peux citer par exemple des projets récents en relation avec l'entreprise Mermec France (Technopôle de Château-Gombert) :

1. Guebailia Walyd, Djermoune Nabil, et Maouia Ahlem, "Contrôle non destructif de containers, imagerie en polarisation", janvier-mai 2018, M1

2. Souche Florian, Sirerol Lucas, et Ponnay Maxime, "Contrôle non destructif de containers, imagerie hyperspectrale et optimisation", janvier-février 2018, M2
3. Mansouibou Sitti, Babe Ely, et Zaki Sayed, "Contrôle non destructif de containers, imagerie hyperspectrale", janvier-février 2018, M2

Les étudiants font une présentation des résultats obtenus sous la forme d'un Power Point, devant la responsable Recherche et Développement. Pouvoir expliquer ce que l'on nous a transmis, c'est la première preuve d'une bonne assimilation des savoirs.

2.1.4 Encadrer et accompagner l'étudiant

Encadrer dans le temps l'étudiant dans l'élaboration d'un travail personnel

Depuis septembre 2017 je suis entièrement responsable de la Licence SPI AGE (qui devient EEA en 2018).

De ce fait, le travail que j'effectue pour encadrer et accompagner un étudiant qui sera diplômé de L3 SPI EEA consiste, par ordre chronologique pour un étudiant donné, à étudier son dossier de candidature, sur e-candidat ou Campus France, et s'il est accepté à lui conseiller si nécessaire -par exemple pour les étudiants provenant de BTS- d'anticiper une année chargée et difficile sous forme de commentaire sur e-candidat. Lors de la présentation de rentrée je donne un aperçu du programme de l'année, en pointant les dates d'examen, et en encourageant les étudiants à demander dès les premiers jours des annales de sujets d'examen aux enseignants responsables d'UE.

Aider l'étudiant dans ses choix pédagogiques et de poursuites d'études, soutenir l'étudiant dans la construction de son projet professionnel

Dès le début du second semestre, je suis sollicité par les étudiants pour écrire des avis de poursuite d'étude, que parfois je ne remplis pas en déconseillant à l'étudiant de s'engager dans une voie qui d'évidence ne lui conviendra pas (informatique théorique par exemple). Ecrire des lettres de recommandation qui permettent aux étudiants de s'orienter correctement et d'avoir toutes les chances d'être acceptés dans une formation qui me semble leur convenir est une activité relativement chronophage mais que j'estime très importante pour l'avenir des étudiants de L3 SPI.

Se rendre disponible pour dialoguer avec l'étudiant

Voici ce qui ressort de l'évaluation (présentée en annexe) par l'OVE du déroulé de l'année de façon générale en L3 SPI AGE :

On remarque que l'item qui a obtenu le meilleur score (3.7) est le suivant :

"L'enseignant responsable de votre année d'études est disponible pour répondre à vos questions"

Ainsi que :

"Vous obtenez des réponses à vos questions en vous adressant aux enseignants de votre formation" (3.7)

Viennent ensuite les items suivants :

"Globalement, vous êtes satisfait(e) du contenu des enseignements" (3.4)

"Vous accédez facilement au service de la scolarité / service administratif de votre formation en dehors de vos heures de cours" (3.4)

"Les objectifs de votre formation sont clairement définis" (3.3)

Comme pistes pour l'amélioration, on note des modalités de formation à revoir pour le PPPE, un emploi du temps moins changeant, le besoin d'informations quant aux possibilités de faire au moins un petit stage à l'étranger (le double diplôme ou quelque chose d'équivalent n'étant pas prévu dans la formation).

2.1.5 Evaluer les apprentissages

Connaître et maîtriser les différentes méthodes d'évaluation

En Licence 2 et Licence 3 SPI, c'est sur les travaux pratiques que je fonde mon évaluation de contrôle continu. En effet, les TP que je mets en oeuvre sont intimement liés aux TDs effectués en cours. Un étudiant qui était présent en TD doit pouvoir réussir son TP facilement. Je n'évalue donc pas mes étudiants en cours de TD, puisque je préfère stimuler la coopération et le dialogue entre étudiants, et entre les étudiants et l'enseignant pendant la phase d'apprentissage qu'est le CM et le TD. De mon point de vue, tout ce qui a trait à une évaluation ou à un contrôle des connaissances et des compétences doit être défini à l'avance, y compris en termes de date avec les étudiants en début d'année. En ce sens, il n'existe pas de 'TD noté', ni bien sûr d'interro surprise.

Je connais d'autres formes de contrôle bien sûr tels les oraux, les rapports individuels ou par équipe, etc. Mais mettre en oeuvre des oraux est très consommateur de temps ; et les étudiants ont suffisamment de travail avec leurs compte-rendus de TP. Trop d'évaluations disperse les étudiants, je préfère que l'examen terminal et les compte-rendus de TP gardent toute leur importance aux yeux des étudiants. En fin de semestre, ils vont ainsi 'tuer le lion' de même que le faisait un guerrier Masai pour être considéré comme un adulte [78], chose qu'il ne faisait, lui, qu'une fois dans sa vie.

L'examen final compte pour 50 % de la note finale, les comptes-rendus de TP pour 50 % également, à l'exclusion de toute autre évaluation. On comprendra que je revendique le fait de ne pas trop diversifier mes outils d'évaluation, afin que les deux pôles d'évaluation (examen, TP) prennent toute leur importance

aux yeux des étudiants.

Informier l'étudiant des modalités d'évaluation

Dans les UE dont je suis responsable ou chargé du CM, j'implique les étudiants dans la définition des modalités d'évaluation des apprentissages. Très concrètement, lors du premier cours, je leur donne les sujets d'examen des années et sessions précédentes, ainsi que, bien sûr, le polycopié de cours, et les énoncés de TD et TP. Lors de ce premier cours je leur fournis également un tableau à remplir, dans l'ordre antichronologique des sujets d'examen. A eux de repérer les mots-clés qui leur semblent important dans un sujet d'examen -même si bien sûr ils ne maîtrisent pas encore son sens- et de trouver les pages correspondantes dans le polycopié, mais aussi dans les TDs et les TPs. Cela leur permet de découvrir de façon ciblée (c'est-à-dire en fonction de ce qui est demandé à l'examen) le programme de l'UE.

Planifier et mettre en oeuvre les activités d'évaluation en fonction des objectifs poursuivis

En cours de semestre, nous résolvons petit à petit les parties des sujets d'examen, en fonction de l'avancement du programme. Je leur demande s'ils pensaient être examinés de cette façon-là ou pas, notamment au vu de ce qui est fait avec l'enseignant (ATER le plus souvent) en TP. Cela ne conduit pas à une note, les étudiants doivent être capables, dans cette activité, de s'auto-évaluer, tel un chercheur qui pense pouvoir proposer les résultats de ses recherches à telle ou telle autre revue selon son facteur d'impact par exemple.

2.1.6 Travailler en équipe

Participer à la conception, à la mise en oeuvre et au suivi de projets pédagogiques, travailler en équipe pluridisciplinaire

Dans le cadre de la mise en place de la nouvelle offre de formation, j'ai été sollicité par l'équipe de portage SPI (Gilles Cartry, Carine Perrin-Pellegrino, et Bénédicte Ealet) pour définir les compétences attendues pour un étudiant en fin de Licence SPI, les acquis d'apprentissage, et les contenus disciplinaires correspondant à chaque acquis, ainsi que les modalités pédagogiques. En fin de processus j'ai vérifié la modélisation Pacôme en collaboration avec Carine Perrin, et la répartition des effectifs en Licence SPI sur la grille du département en collaboration avec Edouard Thiel.

Avec la collaboration de Thibaut Raharijaona, que j'ai motivé pour devenir responsable d'UE intersite pour l'Automatique en Licence 1, j'ai coordonné l'écriture de la fiche pour cette UE et servi d'intermédiaire avec l'équipe de portage de la Licence SPI.

De façon plus générale en interaction avec mon équipe pédagogique, j'ai participé à l'écriture des fiches UE, relu et vérifié toutes les fiches écrites par mes collègues de l'équipe pédagogique avant transmission à Gilles Cartry.

En fin d'année scolaire 2017-2018, c'est Elisabeth Surace, de l'équipe enseignante

du Français au pôle langues de la faculté des sciences, qui m'a contacté pour évoquer le programme d'enseignement du Français en L3 SPI EEA. J'ai mis à sa disposition des ressources Web de bases de données scientifiques en Français et en Anglais :

<http://www.fresnel.fr/perso/marot/Documents/BookmarksSciences.html>

Mme Surace a transmis toutes ces informations à Mme Isabelle Maréchal, qui va vraisemblablement prendre en charge mes étudiants de L3 SPI EEA.

S'organiser, communiquer et collaborer avec d'autres enseignants au sein des dispositifs de formation tout au long de l'année universitaire

Dans mon équipe pédagogique, je fais la promotion de l'utilisation de la grille du département et suis responsable de la bonne tenue de la grille pour le parcours EEA de la L3 SPI, mais aussi pour la Licence SPI dans son ensemble pour ce qui touche à notre équipe pédagogique. En tant que responsable du parcours EEA de la Licence SPI, je m'assure que les services soient correctement répartis et prend l'initiative de proposer les services d'un ATER à un enseignant permanent lorsque par exemple il s'est proposé d'assurer un grand nombre d'heures de TP.

Depuis quelques années j'ai participé à des commissions de recrutement dont celle du Maître de Conférences Zhongliang Li, et en comité plus restreint et interne à Aix Marseille Université à des commissions de recrutement d'ATER. Avec le chef de département Edouard Thiel, le responsable du Master EEEA Rachid Outbib et le responsable de la Licence MEP Mustapha Ouladsine, j'ai participé à la sélection de trois ATER qui interviendront dans nos formations dont la Licence SPI. Le processus de sélection a également impliqué Mouloud Adel, responsable du Master TSI, et Jean Marc Boi, responsable du parcours IMОВI du Master TSI. Dans le cadre de ma responsabilité de salle de TP (B311, B312 à St-Jérôme) je suis amené à travailler en équipe avec le personnel du SESAO pour installer les drivers de logiciels interfacés à des maquettes, vérifier la bonne installation software des salles... Le département Informatique et Interactions, sous l'impulsion d'Edouard Thiel, a financé à hauteur de 20 000 euros la sécurisation de ces salles et du couloir B31. J'ai été impliqué dans ce processus de sécurisation des lieux, sans toutefois faire de commande puisque c'est le chef de département qui l'a fait en personne, mais plutôt pour donner des conseils sur l'installation des portes renforcées, l'emplacement des caméras, etc.

2.1.7 Coordonner un programme pédagogique universitaire

Dans le cadre de ma responsabilité de parcours Licence 3 SPI EEA, j'ai contribué à la mise en place de la nouvelle offre de formation : définition des compétences liées à l'EEA pour tout le parcours SPI, définition des acquis d'apprentissage et des contenus des enseignements en relation avec les compétences attendues, contribution aux fiches AOF, aux fiches ROF. Afin de trouver le bon équilibre entre les unités d'enseignement et les acquis d'apprentissage, et de prendre en compte le cadrage proposé par l'université, j'ai proposé plusieurs versions du

programme de la L3 SPI EEA à l'équipe pédagogique à laquelle j'appartiens. Ce travail n'est pas dénué de difficultés : chacun accorde une certaine importance à son domaine d'expertise et diminuer le nombre d'heures de certaines UE pour laisser la place à un surcroît d'heures d'anglais ou à de nouvelles matières telle l'épreuve intégrative a été difficile. Il a donc fallu amener de façon constructive les collègues à modifier leur programme d'enseignement pour mieux coller au cadrage, leur demander de renoncer à certaines heures pour ne pas dépasser les plafonds d'heures étudiant, etc.

Je participe au conseil de perfectionnement pour la Licence SPI. Dans ce contexte j'ai proposé à la responsable Nathalie Bergeon que soient anticipés les effectifs d'étudiants provenant de Licence 2 SPI et souhaitant poursuivre dans l'un des parcours de la Licence 3 SPI, via une application du type e-candidat non sélective. En effet jusqu'à présent nous n'avons pas de visibilité sur les effectifs en L3 des étudiants en provenance de L2.

2.1.8 Réfléchir à sa pratique pédagogique et la faire évoluer, échanger sur sa pratique avec d'autres enseignants

Echanger sur sa pratique avec d'autres enseignants

Au niveau local, je travaille beaucoup avec mes proches collègues de l'équipe pédagogique tels Thibaut Raharijaona, ou Rachid Outbib, mais aussi Mouloud Adel qui est mon collègue de bureau.

Pour ce qui est de la mise en place de nouvelles maquettes de TP, c'est aussi avec le chef de département Edouard Thiel que j'ai beaucoup échangé. C'est lui par exemple qui m'a appris à dupliquer facilement les cartes micro-SD utilisées dans les Raspberry, mais aussi de façon générale à orienter mes activités pédagogiques vers des maquettes à prix réduit, basées sur des logiciels libres. Au niveau national disciplinaire, afin de me former sur les nouvelles pratiques pédagogiques de mes collègues, j'assiste autant que possible aux sessions 'Education' des conférences scientifiques auxquelles je participe, comme la session 'Signal Processing Education' à Eusipco en 2017 pendant laquelle un collègue de l'ENSEIRB (Eric Grivel) a évoqué la constitution par ses étudiants d'une collection de matériel de télécommunication de différentes époques. J'y ai fait une présentation dérivée de mon article à vocation pédagogique [115].

Mettre à jour ses connaissances en fonction de l'avancée de la recherche

Les étudiants d'aujourd'hui sont des 'digital natives', nés dans le monde du numérique. Si l'on se réfère au programme 'PISA' de l'évaluation des étudiants publié en 2012 [137], 99% des élèves de l'OCDE atteignant l'université disposent d'un ordinateur et d'une connexion internet à la maison. Ils connaissent la diversité des supports informatiques pour les applications grand public : smartphones, tablettes, ordinateurs personnels [138]. Je déduis de ces études qu'il est difficile de maintenir à jour les supports d'enseignement et les setups expérimentaux. Ils doivent être de coût relativement réduit, mais doivent aussi être suffisamment

performants pour offrir aux étudiants la possibilité de saisir rapidement la portée du setup informatique et logiciel qu'ils ont constitué. Le TAM ('technology acceptance model' en anglais ou 'modèle d'acceptation de la technologie') prend en compte l'utilité et la facilité d'utilisation apparentes d'un système informatique. Selon le TAM, les étudiants sont demandeurs de nouvelles technologies lorsqu'ils comprennent leur utilité [9]. De ce fait, j'oriente mes enseignements vers les travaux pratiques. Dans mes enseignements de L2 et L3 en informatique industrielle, je fais travailler les étudiants sur des cartes de démonstration PICDEM 2 Plus[®] qui permettent de tester du code assembleur ou C pour la configuration de ports d'entrées-sorties des PICs. Afin de renouveler ce matériel, une somme de 2200 euros a été dépensée en 2015 (chez Farnell) avec la bienveillance du chef de département Edouard Thiel. Cependant, aucun logiciel ou système d'exploitation ne peut être installé sur un PIC, et la carte de démonstration manque d'éléments de connectique tel un port ethernet. D'autres setups qui incluent une partie hardware et une partie software ont été proposés [132], [163] mais ces setups nécessitent des cartes de traitement numérique plutôt chères proposées par Texas Instruments[®] (plusieurs centaines de dollars US \$, dont 100 dollars environ pour un émulateur de programmation en C [132]). Cela m'a amené, pour les enseignements en L3, à proposer une approche alternative à celles existantes, qui utilise un nano-ordinateur mono-carte à bas coût (le Raspberry Pi). Depuis fin 2014, une série de projets tous bien sûr avec mise en concurrence de trois devis a été financée, à hauteur des sommes suivantes : 1100, 730, 250, 300, 191, 350, et 505 euros chez divers fournisseurs tels Lextronics, Conrad, Farnell, ou Kubii, pour un montant total d'environ 3500 euros. On aura aussi remarqué les sommes relativement modestes des devis que j'ai proposés au département. Les dernières avancées en informatique appliquée impliquent l'augmentation de la quantité de code mis à disposition de tous sur internet (sites OpenCV pour du code C [139], ou Python [153]). C'est dans cette dynamique que j'ai proposé des TPs incluant des Raspberry Pi[®].

Mesurer la relation entre le contenu de ses enseignements et l'insertion professionnelle

Afin de préparer au mieux mes étudiants aux dernières évolutions des outils en informatique et informatique industrielle, je leur propose des projets en relation avec les industriels et leurs besoins. Ceux cités plus haut en partenariat avec Mermec, et le projet de Shiyu Deng et Chen Te Lin : "Visual Basic, interface graphique pour implantation du filtre de Wiener multidimensionnel", de janvier à mai 2017 (M2 POESII), inspiré du travail sous Visual Studio Express de l'un de mes contacts industriels.

Avoir un regard critique constant sur sa pratique et en comprendre l'impact sur les apprentissages des étudiants

Entre 2015 et 2018, j'ai à mon sens pris en compte les remarques des étudiants émises dans les enquêtes OVE (Cf Annexe 2), concernant la structure du cours et le manque de connaissances antérieures. Les moyennes passent de 3.3 (Aix)

et 2.5 (St-Jérôme) en 2015 à 3.0 (Aix) et 3.3 (St-Jérôme) en 2018 ; avec il faut le signaler une promotion quelque peu 'dissipée' à Aix en 2017-2018.

2.2 Activités d'enseignement : bilan et perspectives

Entre 2009 et 2018, mes activités d'enseignement ont brassé un public relativement large de la Licence 2 SPI au Master 2 Images et Systèmes (EEEE), avec une ouverture vers des encadrement d'étudiants issus de l'Ecole Centrale Marseille, des étudiant du Master POESII Europhotonics, et des Doctorants Europhotonics. Depuis 2018-2019, je suis responsable de deux unités d'enseignement en Master Traitement du Signal et des Images.

En termes de thématique, j'ai glissé de l'automatiques vers l'informatique industrielle, tout en maintenant une part de traitement des données, et en augmentant la part des encadrement de projets.

Ces diverses activités m'ont valu à la fin 2018 l'octroi d'une prime d'engagement pédagogique.

De mon point de vue les projets en relation avec le mode académique ou industriel stimulent la créativité des étudiants ; on pourra trouver la liste des projets que j'ai encadrés sur la page suivante :

<http://www.fresnel.fr/perso/marot/#Supervision>

Le bilan de mes activités récentes d'enseignement comprend bien sûr la mise en place de la nouvelle offre de formation. Afin de préparer la nouvelle offre de formation pour le quadriennal 2018-2022, je me suis investi, aux côtés de l'équipe de portage de la Licence SPI et des responsables de parcours, pour définir les compétences que l'on attend d'un étudiant issu de Licence SPI, et en particulier de Licence SPI EEA. Ensemble, nous avons défini les acquis d'apprentissage, les contenus disciplinaires, et les modalités pédagogiques pour les six compétences formulées pour la formation SPI, telle 'Comprendre le fonctionnement de systèmes pluri-technologiques et analyser la partie correspondant à son domaine de spécialisation en s'appuyant sur ses connaissances en sciences fondamentales et en sciences pour l'ingénieur'. La septième compétence, spécifique au parcours EEA, a été définie avec l'équipe de portage mais aussi avec mes collègues de l'équipe pédagogique 61-63 : 'Concevoir des systèmes automatisés de commande, de traitement de l'information, et de conversion de l'énergie électrique dans une approche pluri-technologique'. Aux côtés de mes collègues responsables de parcours, j'ai contribué à l'écriture des fiches AOF, ROF, des fiches UEs destinées aux enseignants pour maintenir une certaine cohérence au sein d'une UE, mais aussi des fiches UE destinées aux secrétariats pédagogiques, qui permettent de structurer un enseignement dans le temps. Le cadrage pour la nouvelle offre de formation 2018-2022 a prévu la mise en place d'une épreuve dite 'intégrative' en L3 SPI EEA. Dans ce contexte, j'ai proposé quatre anciens étudiants en tant qu'intervenants extérieurs : Xuefeng Liu (chercheuse Chinoise Institut Fresnel), Fabien Paumond et Yassine Taa (Santerne), issus de nos formations il y a quelques années ; et Nogaye Thiaw (EKIUM) et Alexandre Darmond

(Groupe SNEF, service Tertiaire), diplômés en 2018 ; leurs interventions se sont déroulées au premier semestre 2018-2019 ; ceci a pour but le renforcement des liens entre nos formations et le monde de la R et D dans l'industrie.

Voici quelques perspectives à mes activités d'enseignement :

Une perspective de démarche pédagogique consiste à mêler l'apprentissage par projet et le cours inversé. La séquence classique d'enseignement que je mets en oeuvre en général est le tryptique, CM, TD, puis TP. Une façon de faire plus innovante consiste à impliquer certains étudiants dans la conception de supports de TP dans le cadre de projets. Certains étudiants découvrent un sujet via un projet ; puis suivent éventuellement les TP l'année suivante. Par exemple, j'ai impliqué deux années de suite des étudiants en M1 puis en M2 (Romain Salerno et Damien Alberola) en projet de traitement d'images, puis dans la conception -plus difficile- d'un TP de communication réseaux entre ordinateurs et Raspberry Pi. En effet ces protocoles de communication nécessitaient des connaissances assez poussées en réseau et bibliothèques Python de type 'Socket', et un tel projet ne pouvait convenir qu'à des M2. La mise en place de ces protocoles de communication par réseau était importante pour moi car elle devait me permettre de créer un TP collaboratif (création d'un programme de détection de visage, par une équipe de trois binômes se répartissant le travail). Ces deux étudiants n'ont pas assisté aux TP finalisés, puisque je les ai mis en place en L3 SPI EEA. Mon idée serait donc d'impliquer, de façon similaire, des étudiants de L2 ou de L3 dans un projet visant à me seconder dans la mise en place d'un TP ; puis à enseigner ces TP l'année suivante ou deux ans après à leur promotion de L3 ou de Master. Ces étudiants feraient une explication (à ma place en quelque sorte) des tenants et aboutissants du TP devant leurs camarades ; ils ne perdraient pas leur temps en TP car c'est moi qui aurais entre temps finalisé l'énoncé ; et de plus ils pourraient porter main forte à leurs camarades en cas de problème, jouant un peu le rôle de l'enseignant. En pratique cela me semble possible dans le cadre des projets de L2 SPI CMI, et dans le cadre de projets de fin d'année en L3 SPI EEA ; les TP seraient dispensés en L3 SPI EEA, et en Master 1 EEEA ou TSI.

J'ai fait en 2019 une première expérience de ce type dans l'UE 'Systèmes embarqués' du Master TSI sur des méthodes de morphing.

C'est le Master TSI qui constitue l'opportunité et est porteur de nouvelles perspectives : pour ce qui est de la mise en place de nouvelles unités d'enseignement, aller vers le domaine des systèmes embarqués me semble pertinent, au vu du développement des technologies miniaturisées. Par ailleurs, un de mes domaines de recherche favori est l'optimisation, et je souhaiterais m'investir plus dans ce domaine en enseignement. C'est pourquoi, pour l'année 2018-2019, je suis intervenu dans des enseignements en Master TSI, en préparation au parcours IPSI. Il s'agit de deux UEs : systèmes embarqués, et optimisation. Etant responsable des ces deux UEs, j'ai proposé comme thème principal pour 'systèmes embarqués' le robot UBBO de la société Axyn. Il est constitué de diverses versions de nano-ordinateurs Raspberry Pi, Arduino, que nous utilisons en travaux pratiques avec

Thibaut Raharijaona. Afin de présenter les systèmes embarqués de façon concrète aux étudiants, j'ai préparé avec l'aide d'un étudiant en stage issu de l'Ecole Centrale Marseille des programmes de contrôle-commande d'une version ouverte de ce robot.

Pour ce qui est du contenu de l'UE d'optimisation, mon collègue Zhogliang Li a présenté les méthodes classiques passant par le calcul d'une dérivée ou d'un gradient. J'ai introduit les méthodes méta-heuristiques telle la méthode par essaim de particules et la méthode du loup gris, avec notamment une application à l'image.

2.3 Annexe : Enquêtes de satisfaction et illustrations

Cette section est une annexe à la synthèse de mes activités d'enseignement. Premièrement, je présente les enquêtes de satisfaction (que l'on peut télécharger) pour :

1. Informatique industrielle à Aix et St-Jérôme en 2015, et en 2018 ;
2. Etude des systèmes échantillonnés (TPs Raspberry et Arduino Sigma3) en 2018 ;
3. Automatismes et Informatique industrielle en 2018 (TPs domotique et microcontrôleurs) ;
4. La formation L3 SPI AGE dans son ensemble en 2017-2018.

Deuxièmement, j'illustre les TP et projets Raspberry Pi évoqués dans la section précédente.

2.3.1 Enquêtes de satisfaction

Les enquêtes de satisfaction fournies par l'Office de la Vie Etudiante (OVE) d'AMU peuvent être téléchargées sur les liens suivants :

www.fresnel.fr/perso/marot/Documents/Enseignements/Evaluation/AGE.pdf pour la formation L3 SPI AGE dans son ensemble en 2017-2018.

Et

www.fresnel.fr/perso/marot/Documents/Enseignements/Evaluation/Ens.pdf pour :

- Informatique industrielle à Aix et St-Jérôme en 2015 (pages 1 à 10), et en 2018 (pages 11 à 24) ;
- Etude des systèmes échantillonnés (TPs Raspberry et Arduino Sigma3) en 2018 (pp. 25 à 31) ;
- Automatismes et info. industrielle en 2018 -TPs domotique et microcontrôleurs- (pp. 32 à 37).

2.3.2 Maquettes Raspberry, illustrations

En Fig. 2.1 est présenté un Raspberry Pi, sans aucun périphérique. En Fig. 2.2 est présenté un exemple de setup incluant un boîtier, et des périphériques.

Les Figs. 2.3, 2.4, et 2.5 présentent quelques résultats obtenus avec des étudiants en projet, sur des problématiques de détections de points saillants dont l'on se sert de points de contrôle pour faire du morphing entre deux images de visage. Les Figs. 2.6 et 2.7 illustrent le principe d'un TP collaboratif avec des setups Raspberry, dont un setup muni d'OpenCV, et un résultat de détection de

visage par des étudiants ayant implanté la méthode de Viola Jones sous Python par équipe de trois binômes.

Pour l'installation d'OpenCV sur les cartes micro-SD, on pourra consulter le site suivant :

<https://www.pyimagesearch.com/2017/09/04/raspbian-stretch-install-opencv-3-python/>



Figure 2.1 – Raspberry Pi

Raspberry Pi
Carte Micro-SD avec système d'exploitation

~ 60 €

Camera Pi
Infrarouge ou classique

~ 40 €

Hub USB
Périphériques
Ecran
Clavier
Souris



Figure 2.2 – RPi avec connectique ; setup complet

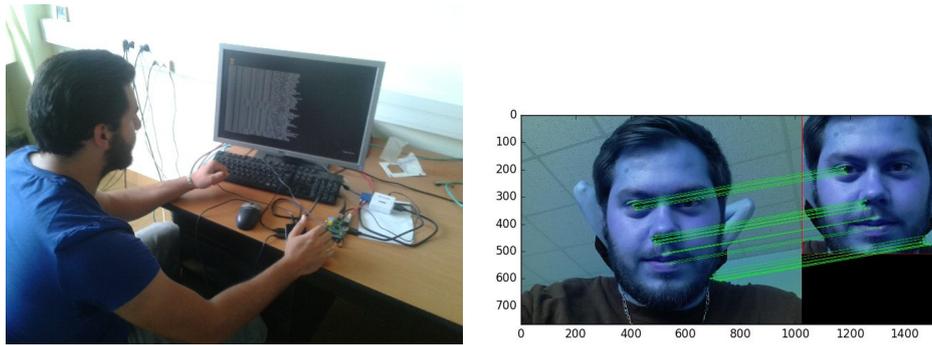


Figure 2.3 – Setup pour un projet : Jérôme Mimouni au travail ; résultat de détection de points saillants obtenu sur Alban Albertengo

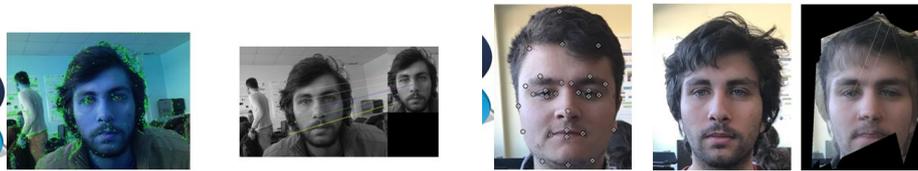


Figure 2.4 – Résultat de détection de points saillants obtenu sur Alexandre Darmon ; utilisation des points saillants pour une application de morphing par Lucas Sirerol et Alexandre Darmon



Figure 2.5 – Morphing appliqué à des personnes non impliquées dans le projet

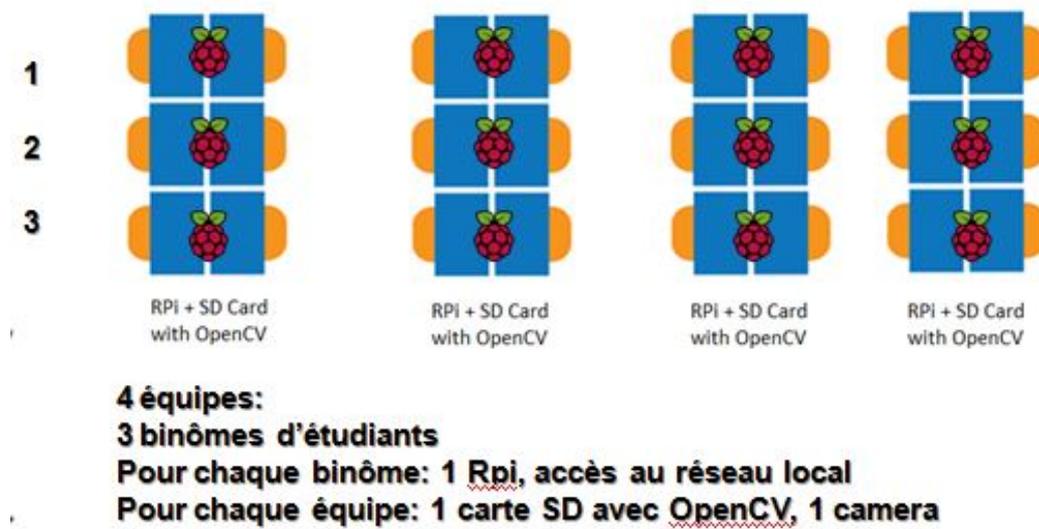
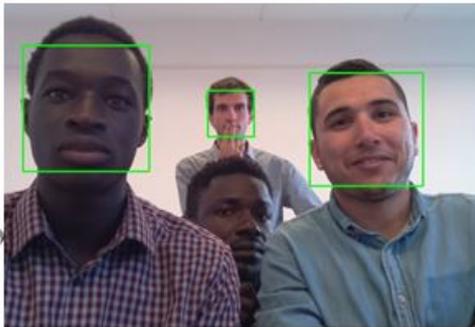


Figure 2.6 – Schéma de classe du TP collaboratif

Détection de visages



```
import picamera
import cv2

1 camera = picamera.PiCamera()
  camera.resolution = (1024,768)
  camera.capture('image.jpg')
  camera.close()
  image = cv2.imread('image.jpg')

2 faceCascade = cv2.CascadeClassifier...
  ('haarcascade_frontalface_default.xml')

  faces = faceCascade.detectMultiScale...
  (image, 1.3, 5)

3 for(x, y, w, h) in faces:
    cv2.rectangle...
    (image, (x,y), (x+w, y+h),...
    (0, 255, 0), 2)

  namewindow = "Faces found"
  cv2.imshow(namewindow, image)
  cv2.waitKey(0)
  cv2.destroyWindow(namewindow)
```

Figure 2.7 – Résultat obtenu par des étudiants : extrait de code et image de détection

Synthèse des activités de recherche

3 Rappels concernant ma thèse

3.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de rappeler quels ont été mes thèmes de recherche durant ma thèse. En effet on pourra noter à la lecture de ce manuscrit une certaine continuité entre mes travaux de thèse et les travaux réalisés par les doctorants que j'ai pu encadrer. Il me semble important de montrer que j'ai su faire la promotion de ces thématiques auprès des doctorants, tout en sachant en développer d'autres, entièrement nouvelles, comme les aspects interface homme machine ou l'optimisation bio-inspirée. Dans ce chapitre je détaillerai donc mes contributions dans le domaine de l'analyse d'images par des méthodes inspirées du traitement d'antenne, et par des méthodes globales d'optimisation, que pour autant, je n'ai fait qu'adapter.

Durant ma thèse, j'ai également étudié des méthodes de filtrage tensoriel, avec application au débruitage de données multidimensionnelles. Ce travail a été publié dans [133]. J'ai poursuivi ces travaux en début de carrière de MCF avec par exemple l'introduction de l'algorithme du point fixe pour l'estimation rapide de vecteurs engendrant le sous-espace signal [118], puis en m'intéressant au traitement des données hyperspectrales [102, 90]. Je me suis formé aux algorithmes de transformée en ondelettes multidimensionnelles en étudiant les travaux de Lin Tao, un doctorant de l'équipe GSM, puis j'ai encadré Abir Zidi pour développer des méthodes d'estimation automatique de rangs multiples dans le paradigme qui mêle ondelettes et filtrage de Wiener multidimensionnel. Le sujet du traitement du signal tensoriel ne sera pas développé dans ce chapitre de rappels concernant ma thèse afin qu'il reste relativement succinct. Le filtre de Wiener multidimensionnel fait l'objet de la section ?? du chapitre 7 de ce manuscrit. En section 3.2, je rappelle les principes de la détection de contours par des méthodes de traitement d'antenne. Je montre comment j'ai étendu ces méthodes à des contours circulaires en section 3.3, puis à des contours distordus en section 3.4. Dans la suite du manuscrit, sauf indication contraire, on note $j = \sqrt{-1}$.

3.2 Estimation de contours rectilignes

3.2.1 Modèle de données, génération de signaux à partir d'une image

Pour adapter les méthodes du traitement d'antenne à l'estimation de contours, le contenu de l'image doit être transcrit en un signal. Cette transcription est possible par des conventions adéquates pour la représentation d'une image, et par

un schéma de génération particulier, proposé à l'origine dans les années 90 par Hamid Aghajan [4, 2, 31]. Une fois qu'un signal a été créé, les méthodes de traitement d'antenne peuvent être utilisées pour estimer 'en aveugle' les caractéristiques d'une droite traversant l'image par exemple. Soit I une image enregistrée, telle qu'en Fig. 3.1(a) (Cf aussi [2]). Dans la suite du chapitre, on note $j = \sqrt{-1}$.

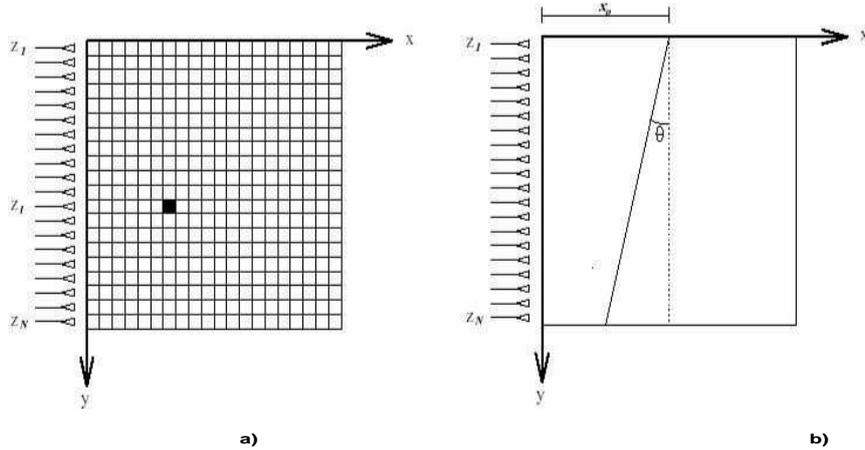


Figure 3.1 – Modèle d'image : (a) L'image-matrice, munie d'un ensemble de capteurs virtuels formant une antenne de N capteurs équidistants, (b) Une ligne droite caractérisée par son angle θ et son offset x_0 .

Nous considérons que I contient d lignes droites et un bruit additif uniformément distribué. L'image-matrice est la version numérique de l'image enregistrée. Elle contient $N * C$ pixels. Un formalisme adopté en [6] permet de générer un signal par l'équation suivante :

$$z(i) = \sum_{k=1}^C I(i, k) \exp(-j\mu k), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

où $\{I(i, k); i \in \{1, \dots, N\}; k \in \{1, \dots, C\}\}$ sont les pixels de l'image. L'Eq. (3.1) simule une antenne inéaire : chaque ligne de l'image correspond à une composante de signal, comme si elle était associée à un capteur. L'ensemble des capteurs forment une antenne linéaire. On suppose que l'image est binaire, avec les pixels à 1 qui sont les pixels de contour. Lorsque d contours sont présents, avec des paramètres d'angle $\{\theta_k\}$ et d'offset x_{0k} ($k = 1, \dots, d$), et si l'image contient des pixels de bruit, le signal généré sur le $i^{\text{ème}}$ capteur, en face de la $i^{\text{ème}}$ ligne, est [6] :

$$z(i) = \sum_{k=1}^d \exp(j\mu(i-1)\tan(\theta_k)) \exp(-j\mu x_{0k}) + n(i) \quad (3.2)$$

Où μ est un paramètre de propagation fixé *a priori* [5] et $n(i)$ est une composante de bruit due aux pixels de bruit dans la $i^{\text{ème}}$ ligne.

On définit : $a_i(\theta_k) = \exp(j\mu(i-1)\tan(\theta_k))$, $s_k = \exp(-j\mu x_{0k})$, L'Eq. (3.2) devient :

$$z(i) = \sum_{k=1}^d a_i(\theta_k)s_k + n(i), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.3)$$

En groupant les termes sous la forme d'un vecteur, l'Eq. (3.3) devient : $\mathbf{z} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s} + \mathbf{n}$, avec $\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_d)]$ where $\mathbf{a}(\theta_k) = [a_1(\theta_k), a_2(\theta_k), \dots, a_N(\theta_k)]^T$, avec $a_i(\theta_k) = \exp(j\mu(i-1)\tan(\theta_k))$, $i = 1, \dots, N$, T signifiant transpose. L'algorithme SLIDE (Subspace-based LINE DETECTION) [6] utilise la méthode TLS-ESPRIT (Total-Least-Squares Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) pour estimer les valeurs d'angle. Pour estimer les valeurs d'offset, l'extension de la transformée de Hough [83] peut être utilisée. Cette méthode est limitée par son coût numérique élevé. Nous avons développé une autre méthode [24, 25]. celle-ci reste dans le cadre de l'analogie avec le traitement d'antenne, et nous adaptons une méthode haute résolution nommée MFBLP (Modified Forward Backward Linear Prediction) [24] qui est associée à une méthode dite 'à paramètre de propagation variable' inventée dans [5]. Le formalisme introduit dans cette section tient compte du cas où les contours sont en niveaux de gris, non binaires [3].

3.2.2 Méthode d'estimation des angles, résumé de la méthode SLIDE

La méthode d'estimation des angles est divisée en deux parties : l'estimation d'une matrice de covariance, et l'application d'un critère des moindres carrés totaux.

De nombreux travaux ont été menés pour estimer de façon fiable une matrice de covariance quand le nombre de réalisations de signaux est faible et la durée des signaux courte. La situation est souvent rencontrée, par exemple, avec des signaux sismiques. Pour faire face à cela, on calcule des moyennes sur plusieurs domaines de fréquence, pour remplacer le moyennage temporel. Dans cette étude la matrice de covariance est calculée *via* un moyennage temporel [54]. A partir du vecteur d'observation, on construit K vecteurs de longueur M , en respectant la condition $d < M \leq N - d + 1$, d étant supposé connu *a priori*. Pour maximiser le nombre de vecteurs, nous choisissons $K = N + 1 - M$. Les sous-vecteurs, groupés, donnent la matrice $\mathbf{Z}_K = [\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_K]$, où $\mathbf{z}_l = \mathbf{A}_M(\theta)\mathbf{s}_l + \mathbf{n}_l$, $l = 1, \dots, K$. La matrice $\mathbf{A}_M(\theta) = [\mathbf{a}_M(\theta_1), \dots, \mathbf{a}_M(\theta_d)]$ est une matrice de Vandermonde de taille $M \times d$. La partie 'Signal Utile' est supposée être indépendante du bruit, et les méthodes par sous-espace peuvent être utilisées pour retrouver les valeurs de paramètres des sources. En général on passe par la décomposition en éléments propres de la matrice de covariance. On notera une exception : la méthode du propagateur [99]. Dans notre cas, les sources sont les contours dans l'image,

leurs paramètres les valeurs d'angle. Ils sont estimés de la façon suivante [3] :

$$\hat{\theta}_k = \tan^{-1}\left[\frac{1}{(\mu * \Delta)} \text{Im}\left(\ln\left(\frac{\lambda_k}{|\lambda_k|}\right)\right)\right], \quad (3.4)$$

où $\{\lambda_k, k = 1, \dots, d\}$ sont les valeurs propres d'une matrice diagonale unitaire qui relie les mesures obtenues sur une première partie de l'antenne aux mesures obtenues sur une deuxième partie de l'antenne. Δ est la distance entre deux capteurs, fixée en pratique à 1 dans notre modèle. Une fois les valeurs d'angle estimées, on peut estimer les valeurs d'offset.

3.2.3 Estimation des valeurs d'offset

La méthode de l'état-de-l'art qui pourrait être adaptée en premier lieu est l'extension de la transformée de Hough [151]. Son principe est celui d'une recherche exhaustive du nombre de pixels selon toutes les valeurs d'angle et d'offset possible, avec un pas dans les valeurs test dont dépendra la précision des valeurs estimées. En l'occurrence si l'on connaît les valeurs d'angles, la valeur d'offset estimée correspondra à celle où l'on trouve le plus de pixels alignés. Une seconde méthode consiste à associer un schéma de propagation à vitesse variable [4, 5, 3] et une méthode haute résolution du traitement d'antenne, MFBLP. Nous avons proposé dans [26] d'associer les deux. Cela conduit à une méthode plus rapide que la transformée de Hough. L'idée de base est de créer un paramètre de propagation qui est variable selon la ligne dans l'image [3]. On obtient alors un signal à phase linéaire. Pour la première valeur d'angle, par exemple, le signal reçu sur le capteur i ($i = 1, \dots, N$) est :

$$z(i) = \sum_{k=1}^{d_1} \exp(-j\tau x_{0k}) \exp(j\tau(i-1)\tan(\theta_1)) + n(i) \quad (3.5)$$

d_1 est le nombre de droites d'orientation θ_1 . Quand τ varie linéairement, c'est-à-dire, $\tau = \alpha(i-1)$, on obtient

$$z(i) = \sum_{k=1}^{d_1} \exp(-j\alpha(i-1)x_{0k}) \exp(j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_1)) + n(i) \quad (3.6)$$

Après une division par $a_i(\theta_1) = \exp(j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_1))$, nous obtenons :

$$w(i) = \sum_{k=1}^{d_1} \exp(-j\alpha(i-1)x_{0k}) + n'(i), \quad (3.7)$$

C'est la combinaison de d_1 sinusoïdes de fréquences :

$$f_k = \frac{\alpha X_{0k}}{2\pi}, \quad k = 1, \dots, d_1. \quad (3.8)$$

Par conséquent, on aboutit à un problème d'estimation de fréquences. Ce type de problème, dans lequel les sources ont la même amplitude, a été considéré dans [156], qui présente la méthode MFBLP. Cette méthode est appliquée au vecteur \mathbf{w} .

Voici les grandes étapes de cet algorithme :

1) Pour un vecteur à N composantes \mathbf{w} , on forme la matrice \mathbf{Q} de taille $2 * (N - L) \times L$, où $1 \leq L \leq N - 1$. La j^{eme} colonne \mathbf{q}_j de \mathbf{Q} est définie par :

$$\mathbf{q}_j = [w(L - j + 1), \dots, w(N - j), w^*(j + 1), \dots, w^*(N - L + j)]^T.$$

on construit un vecteur de longueur $2 * (N - L)$:

$\mathbf{h} = [w(L + 1), \dots, w(N), w^*(1), \dots, w^*(N - L)]^T$. On calcule la décomposition en valeurs singulières de \mathbf{Q} : $\mathbf{Q} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H$.

2) On forme une matrice $\mathbf{\Sigma}$, fixant à 0 les $L - 1$ plus petites valeurs singulières contenues dans $\mathbf{\Lambda}$.

3) On forme un vecteur \mathbf{g} à partir du calcul suivant : $\mathbf{g} = [g_1, g_2, \dots, g_L]^T = -\mathbf{V} * \mathbf{\Sigma}^\# * \mathbf{U}^H * \mathbf{h}$ où $\mathbf{\Sigma}^\#$ est la pseudo-inverse de $\mathbf{\Sigma}$.

4) On détermine les racines de la fonction polynômiale H , où $H(\gamma) = 1 + g_1\gamma^{-1} + g_2\gamma^{-2} + \dots + g_L\gamma^{-L}$.

5) L'un des zéros de H est situé sur le cercle unité. Son argument est la valeur de fréquence à estimer. Selon Eq. (3.5) cette valeur de fréquence est proportionnelle à la valeur d'offset, le coefficient de proportionnalité étant $-\alpha$.

Dès que le nombre de pixels dans l'image devient élevé, la complexité numérique de la transformée de Hough augmente, ce qui n'est pas le cas de la méthode proposée.

3.2.4 Quelques exemples

Une application de nos méthodes peut concerner le contrôle non-destructif dans le cadre de la vision robotique. Supposons qu'un tel robot prenne une photo telle qu'en Fig. 3.2. Ce robot pourrait détecter la prochaine traverse à remplacer, la soulever avec un bras, puis en replacer une nouvelle.

3.3 Contours circulaires

Une antenne linéaire virtuelle permet de caractériser des contours linéaires dans une image. L'idée de départ dans le cadre de la caractérisation de contours

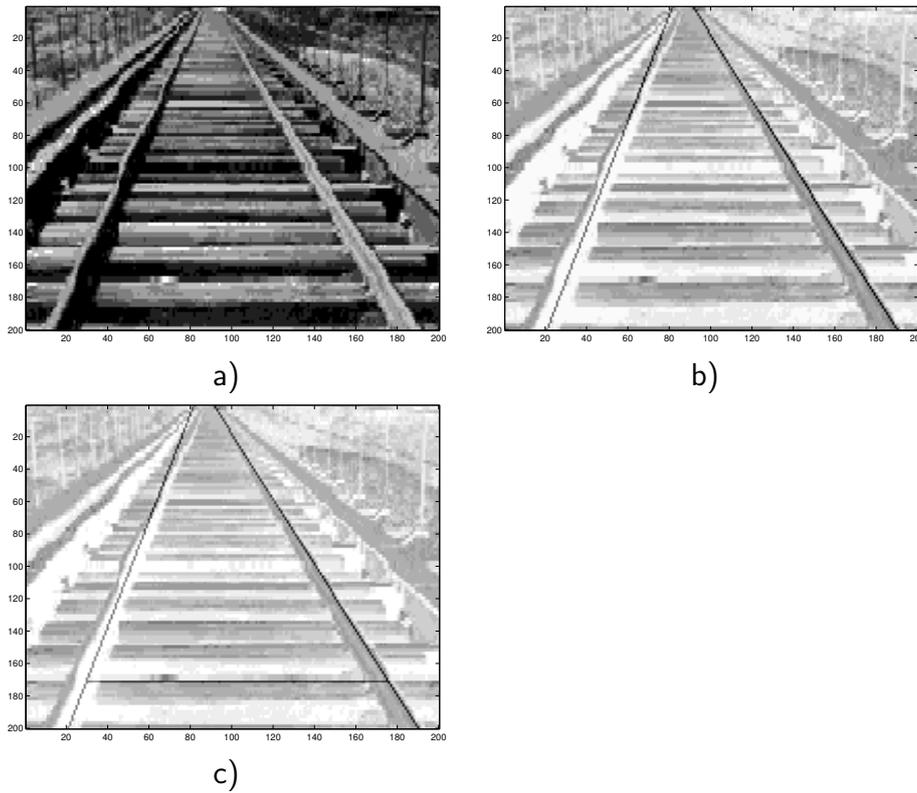


Figure 3.2 – Application de détection de contours : (a) - Image transmise ; (b) détection des rails pour contrôler la progression du robot ; (c) localisation de la première traverse.

circulaires a été d'adapter la forme de l'antenne à la forme du contour à caractériser : ainsi est apparu le concept d'antenne circulaire virtuelle. En adaptant la forme de l'antenne à la forme du contour à retrouver, l'objectif était de générer des signaux à phase linéaire.

3.3.1 Position du problème et génération de signal virtuel

Notre objectif est d'estimer le rayon d'un cercle, puis les distortions qui peuvent exister entre un contour dit 'étoilé' et le cercle qui en est la meilleure approximation. Pour cela nous proposons une antenne circulaire, qui permet de générer un signal à phase linéaire à partir d'une image contenant un quart de cercle. Ces travaux ont été publiés dans [109]. Cela suppose la connaissance *a priori* des coordonnées du centre. On expliquera plus loin comment les estimer. La Fig. 3.8(a) présente une image binaire I . Le contour que cette image contient est proche d'un cercle de rayon r et de coordonnées (l_c, m_c) . La Fig. 3.8(b) montre une sous-image extraite de l'image originale, de façon à ce que le centre soit en haut à gauche. On associe cette sous-image avec l'ensemble de coordonnées

polaires (ρ, θ) , de façon à ce que chaque pixel soit caractérisé par les coordonnées $(r + \Delta\rho, \theta)$, où $\Delta\rho$ est le décalage entre le contour et le cercle qui en est la meilleure approximation, pour une coordonnée θ . Les contours considérés sont étoilés, et peuvent donc être décrits par la relation : $\rho = f(\theta)$ où $f : [0, 2\pi] \mapsto \mathbb{R}_+$. Le point de coordonnées $\rho = 0$ correspond au barycentre du contour.

On a évoqué plus haut l'extention de la transformée de Hough. La transformée de Hough généralisée, maintenant, estime le rayon de cercles concentriques quand le centre en est connu. Son principe est de compter le nombre de pixels en arc de cercle.

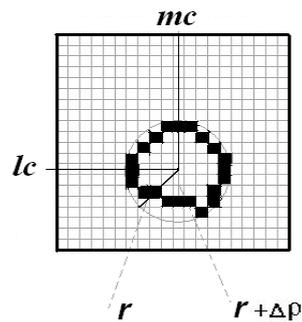


Figure 3.3 – Contour étoilé : rayon r du cercle, décalage $\Delta\rho$.

Dans la méthode de génération de signal utilisée, un paramètre de propagation est posé. L'antenne est de rayon R_a de façon à ce que $R_a = \sqrt{2}N_s$ où N_s est le nombre de lignes ou colonnes dans la sous-image, sachant que $N_s = \max(N - l_c, N - m_c)$ où l_c et m_c sont les coordonnées du centre (Cf Fig. 3.8). Les directions de génération de signal vont du coin en haut à gauche au capteur ciblé. L'antenne est composée de S capteurs, et le signal généré comprendra S composantes de signal.

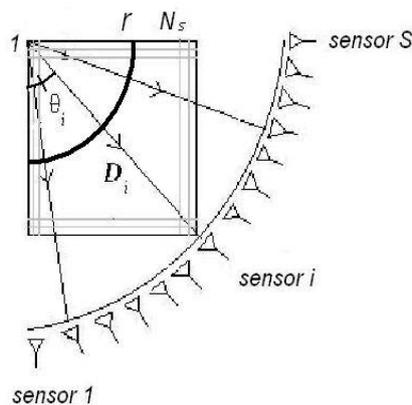


Figure 3.4 – Antenne circulaire à S capteurs

Soit D_i , une direction de génération. Il s'agit d'une droite faisant un angle

θ_i avec la verticale et qui croise le coin supérieur gauche. La $i^{\text{ème}}$ composante ($i = 1, \dots, S$) du signal \mathbf{z} générée est comme suit :

$$z(i) = \sum_{\substack{l,m=1 \\ (l,m) \in D_i}}^{l,m=N_s} l(l, m) \exp(-j\mu\sqrt{l^2 + m^2}), \quad (3.9)$$

L'entier l (resp. m) indice les lignes (resp. les colonnes) de l'image ; et μ est le paramètre de propagation [109]. Chaque capteur indicé par i est associé à une direction D_i d'orientation $\theta_i = \frac{(i-1) \cdot \pi/2}{S}$.

Dans l'Eq. (3.9), le terme $(l, m) \in D_i$ signifie que seuls les pixels appartenant à D_i sont pris en compte pour la génération de la $i^{\text{ème}}$ composante de signal. Le nombre minimum de capteurs à utiliser est $S = \sqrt{2}N_s$.

3.3.2 Méthode d'estimation du rayon

Dans le cas général il existe plus d'un cercle par centre. Nous nous proposons d'estimer d valeurs proches de rayon avec un schéma de propagation à vitesse variable. On pose $\mu = \alpha(i - 1)$ pour le paramètre de propagation, pour chaque capteur i , avec $i = 1, \dots, S$. Selon l'Eq. (3.9), le signal généré est le suivant :

$$z(i) = \sum_{k=1}^d \exp(-j\alpha(i - 1)r_k) + n(i), \quad i = 1, \dots, S \quad (3.10)$$

où $r_k, k = 1, \dots, d$ sont les valeurs de rayon, et $n(i)$ un terme de bruit. Les composantes $z(i)$ formeront le vecteur \mathbf{z} . Nous avons appliqué la méthode TLS-ESPRIT pour estimer les valeurs de rayon $r_k, k = 1, \dots, d$, le nombre des cercles concentriques étant estimé par un critère statistique du type MDL.

Dans [109], nous avons proposé d'adapter la méthode d'optimisation déterministe DIRECT [69] pour estimer les faibles distortions entre un contour étoilé et le cercle qui en est la meilleure approximation.

3.3.3 Antenne linéaire pour l'estimation des coordonnées du centre

Pour estimer les coordonnées du centre de cercles concentriques, nous avons repris le concept d'antenne linéaire. La $l^{\text{ème}}$ composante de signal, générée à partir de la $l^{\text{ème}}$ ligne, est obtenue par : $z_{lin}(l) = \sum_{m=1}^N l(l, m) \exp(-j\mu m)$. Les sections non-nulles de signal indiquent la présence d'un contour ; leur milieu en fournit la coordonnée selon les lignes, du centre (Cf Fig. 3.5). J'ai poursuivi ces travaux, après ma thèse, en considérant des cercles qui se croisent [101].

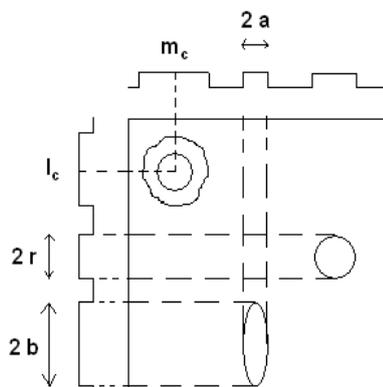


Figure 3.5 – Contours approximativement rectilignes ou ellipses. r est le rayon, a et b les paramètres axiaux de l'ellipse.

3.3.4 Quelques résultats de caractérisation de cercles

En Fig. 3.6, nous montrons un résultat obtenu par la méthode proposée et la transformée de Hough [83]. Dans les deux cas l'image est bruitée avec un bruit Gaussien, de moyenne 0.02 et d'écart-type 0.009, sur 20% des pixels. Les temps de calcul sont de 0.3 sec. pour la méthode proposée et 0.5 sec. pour la transformée de Hough.

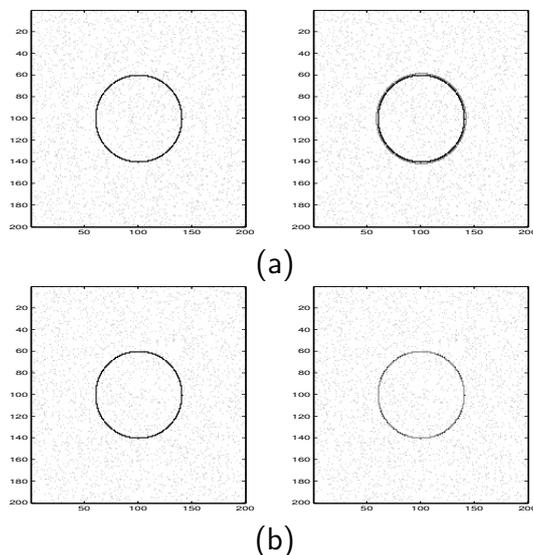


Figure 3.6 – Un cercle : estimation de rayon : (a) Méthode proposée, (b) Transformée de Hough.

L'erreur d'estimation sur le rayon est de moins de 0.1 pixel quelle que soit la méthode. Les travaux présentés ci-après concernent l'estimation de contours

'distordus' notamment étoilés. Ils sont présentés dans ce manuscrit car ils ont inspirés les travaux de deux thèses que j'ai co-encadrées en début de carrière de Maître de Conférences.

3.4 Optimisation globale et interpolation par spline pour l'estimation de contours distordus

On présentera dans cette section un bref état-de-l'art concernant les méthodes d'optimisation qui ont été adaptées pour caractériser des contours distordus. On verra ensuite comment une méthode d'optimisation a été associée à l'interpolation par splines pour estimer les décalages entre des contours approximativement linéaires ou circulaires et le contour strictement linéaire ou circulaire qui en est la meilleure approximation.

3.4.1 Quelques notions d'optimisation globale déterministe

Pendant ma thèse, je me suis consacré à l'estimation de contours distordus avec des méthodes d'optimisation globales, initialisées par les méthodes présentées précédemment qui sont dédiées aux contours rectilignes et circulaires. Pour cela, j'ai adapté des méthodes d'optimisation globales déterministes. Une méthode d'optimisation a pour objectif de minimiser (ou maximiser) une fonction en faisant correspondre à un ensemble de paramètres d'entrée pour la fonction un score. L'objectif de toute méthode d'optimisation est donc de trouver l'emplacement dans lequel le score est le plus bas (dans le cas d'une minimisation). Un exemple de méthode globale déterministe est Dividing Rectangles (DIRECT) [69], qui émet l'hypothèse que la fonction à minimiser est k -Lipschitzienne. DIRECT divise l'espace de recherche en plusieurs hypercubes (des carrés lorsqu'un problème de dimension 2 est considéré). Alors, une valeur de score est calculée au centre de chaque hypercube. Les hypercubes donnant les scores les plus bas sont alors divisés en hypercubes plus petits. Un autre exemple de méthode déterministe est celle de Nelder-Mead [84]. Elle minimise une fonction objectif donnant un scalaire, qui peut être non-linéaire et prendre plusieurs variables en entrée, et ce sans information sur la dérivée. Elle est connue pour conduire à un décroissement rapide des valeurs de fonction objectif [84]. Il a été montré cependant que, en dimension supérieure ou égale à deux, la méthode de Nelder-Mead peut avoir tendance à converger vers un minimum local [47].

3.4.2 Contours approximativement rectilignes distordus

On conserve le même formalisme de génération de signal qu'en section 3.2. L'objectif est maintenant de considérer le cas plus général de contours légèrement distordus et non plus strictement linéaires ou circulaires.

Initialisation de l'algorithme

On utilise l'algorithme SLIDE, qui fournit les paramètres de la droite qui représente au mieux le contour à caractériser. Nous considérons le cas où il n'y a qu'un seul contour. On construit un vecteur d'initialisation \mathbf{x}_0 , contenant la position des pixels de la droite d'initialisation :

$$\mathbf{x}_0 = [x_0, x_0 - \tan(\theta), \dots, x_0 - (N - 1) \tan(\theta)]^T$$

La Fig. 3.7 représente un tel contour distordu, et la droite d'initialisation.

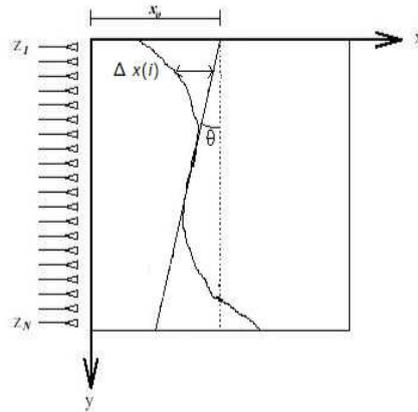


Figure 3.7 – Contour approximativement rectiligne distordu. Décalages $\Delta x(i)$

Les valeurs $x(i)$, $i = 1, \dots, N$, position des pixels pour chaque ligne i , peuvent être exprimés par : $x(i) = x_0 - (i - 1) \tan(\theta) + \Delta x(i)$, $i = 1, \dots, N$ où $\Delta x(i)$ est un décalage pour la ligne i entre contour d'initilisation et contour à retrouver.

Algorithme d'optimisation

Nous souhaitons déterminer les N valeurs $x(i)$, $i = 1, \dots, N$, qui forment un vecteur \mathbf{x}_{input} , sachant que le signal généré est le suivant pour chaque composante :

$$z(i) = \exp(-j\mu x(i)), \forall i = 1, \dots, N \quad (3.11)$$

Soit, pour le vecteur de ces composantes :

$$\mathbf{z}_{input} = [\exp(-j\mu x(1)), \dots, \exp(-j\mu x(N))]^T \quad (3.12)$$

Nous initialisons l'algorithme avec le vecteur \mathbf{x}_0 . Ensuite, nous minimisons le critère suivant par un algorithme itératif. Pour chaque itération k :

$$J(\mathbf{x}_k) = \|\mathbf{z}_{input} - \mathbf{z}_{estimated \text{ for } \mathbf{x}_k}\|^2 \quad (3.13)$$

où $\|\cdot\|$ est la norme \mathbb{C}^N . D'une part nous avons adapté l'algorithme du gradient, car il est facile de calculer la dérivée de la fonction à minimiser : $\forall k \in \mathbb{N} : \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \lambda \nabla(J(\mathbf{x}_k))$, λ est un paramètre de descente. Ainsi, en minimisant J , nous trouvons les composantes du vecteur \mathbf{x} qui conduisent au signal \mathbf{z} qui est le plus proche du signal généré. Un gradient à pas variable permet éventuellement d'accélérer la vitesse de convergence.

Nous avons mis au point une méthode plus élaborée basée sur DIRECT [69] et l'interpolation par spline [98]. A chaque étape, \mathbf{x}_k est calculé en faisant une interpolation entre les valeurs de 'noeuds' estimées par DIRECT. Ainsi, nous diminuons le temps de calcul de la procédure (DIRECT étant en effet en soi une méthode très lente dès que le nombre d'inconnues à retrouver est élevé). De plus, nous pouvons partir du principe que les contours à retrouver sont continus et non interrompus.

3.4.3 Contours approximativement circulaires distordus

Pour retrouver les distortions entre un contour étoilé et un cercle, nous nous concentrons successivement sur les quatre quarts d'images qui correspondent chacun à un quart de contour. Par exemple, dans l'image Fig. 3.8, le quart inférieur droit est représenté.

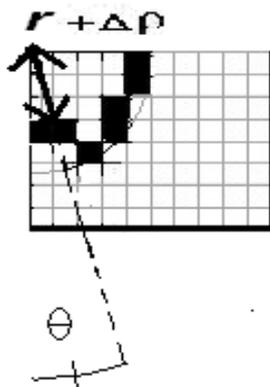


Figure 3.8 – Quart de contour étoilé, coordonnées (ρ, θ) . Rayon r du cercle. Décalage $\Delta\rho$.

Le contour présent dans la sous-image peut être décrit par un ensemble de coordonnées polaires : $\{\rho(i), \theta(i), i = 1, \dots, S\}$. Nous souhaitons estimer les S inconnues $\rho(i), i = 1, \dots, S$ qui caractérisent le contour, et forment le vecteur suivant :

$$\boldsymbol{\rho} = [\rho(1), \rho(2), \dots, \rho(S)]^T, \quad (3.14)$$

L'idée de base est que $\boldsymbol{\rho}$ peut être exprimé par : $\boldsymbol{\rho} = [r + \Delta\rho(1), r + \Delta\rho(2), \dots, r + \Delta\rho(S)]^T$ (Cf. Fig. 3.8), où r est le rayon du cercle qui est la meilleure approxi-

mation du contour à retrouver. Les paramètres $\Delta\rho(1), \dots, \Delta\rho(S)$ peuvent être estimés par le même algorithme d'optimisation que celui présenté en sous-section 3.4.2.

On peut généraliser cet algorithme en une méthode 'multi-résolution' ou 'multi-étape' : à chaque étape, on augmente le nombre de noeuds d'interpolation, et on diminue le nombre d'itérations de DIRECT, pour s'approcher au mieux en phase finale du contour à retrouver.

3.4.4 Quelques résultats

3.4.4.1 images synthétiques

Nous avons étudié la robustesse de la méthode proposée et de "gradient vector flow" à l'importance de la courbure du contour à retrouver. Les images résultat présentées ci-dessous contiennent chacune un cercle distordu différent, caractérisé par une amplitude de distortions variable. Nous montrons ici des résultats obtenus avec des images non bruitées : l'image 3.9 présente les résultats obtenus avec la méthode proposée, l'image 3.10 présente les résultats obtenus avec la méthode Gradient Vector Flow (GVF) [165].

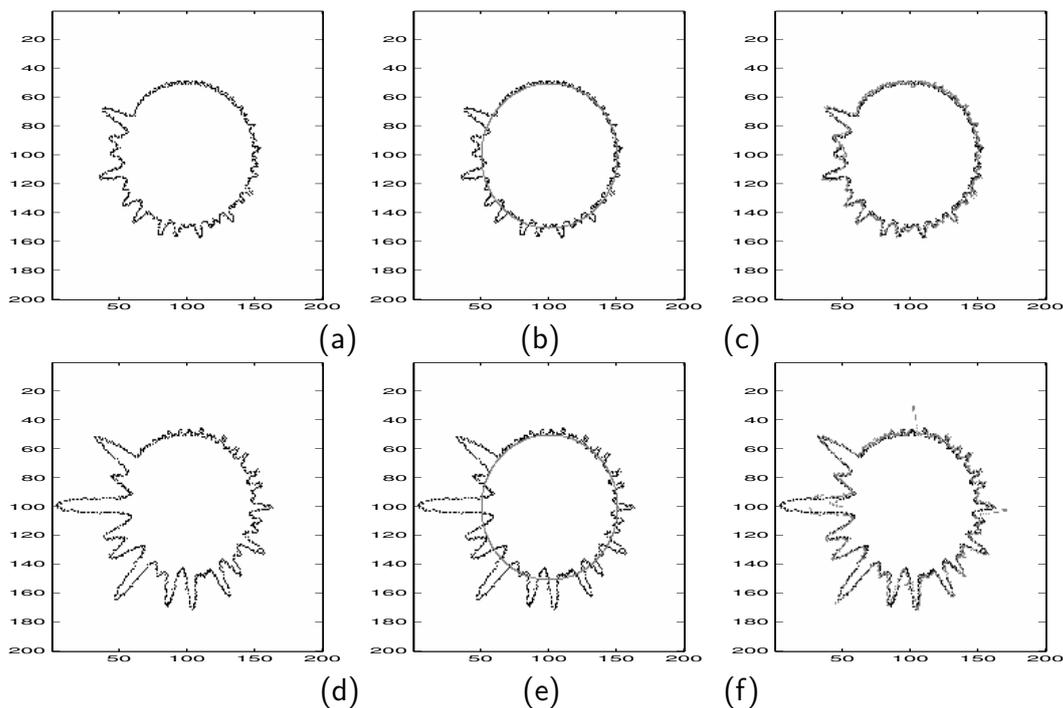


Figure 3.9 – Exemples d'images à traiter contenant le contour le moins (a) et le plus distordu (d), l'initialisation (b,e) et l'estimation finale utilisant la méthode proposée (c,f). *ME* : 1.4 pixel et 2.7 pixels.

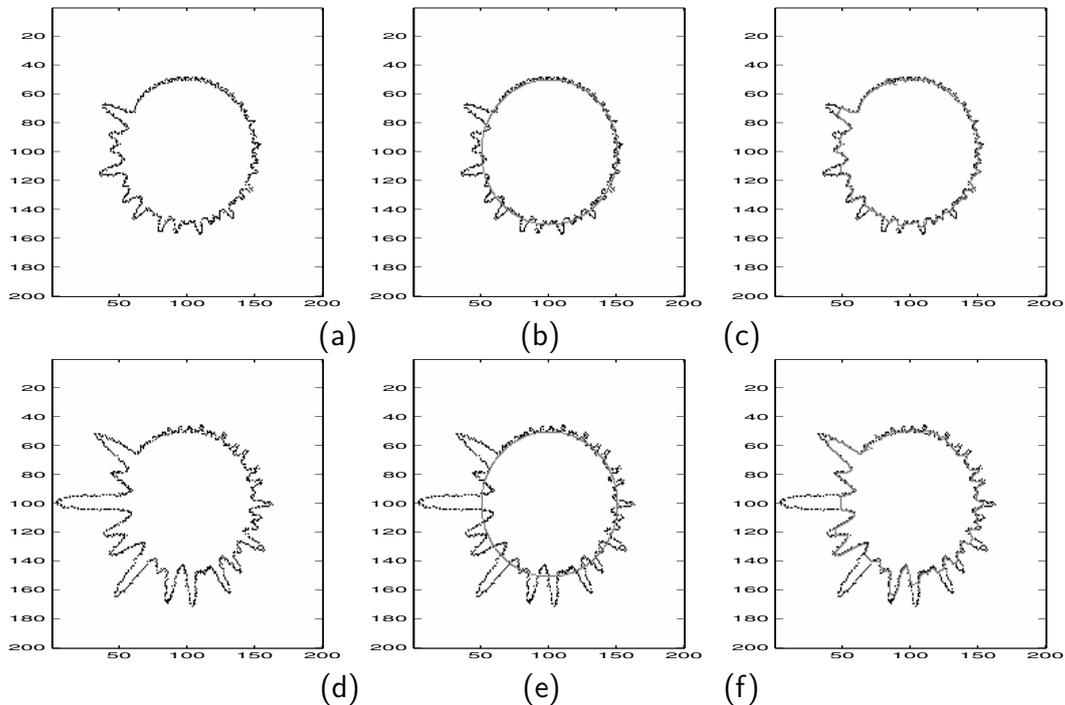


Figure 3.10 – Exemples d'images à traiter contenant le contour le moins (a) et le plus distordu (d), l'initialisation (b,e) et l'estimation finale utilisant la méthode Gradient Vector Flow (c,f). ME : 1.4 pixel et 4.1 pixels.

Pour chaque quart d'image, les temps de calcul sont respectivement 0.28 sec. pour la génération de signal, 0.15 sec. pour faire tourner l'algorithme du gradient à pas variable -50 itérations sont nécessaires-; et 12 sec. pour faire tourner l'algorithme GVF. L'algorithme proposé est donc cinq fois plus rapide que GVF. Les résultats sont donnés en terme de valeur moyenne d'erreur sur la coordonnée radiale de chaque pixel. Cette valeur moyenne d'erreur est notée ME . L'algorithme GVF est mis en défaut au niveau de sa moindre capacité à investir de fortes concavités.

3.4.4.2 images 'real-world'

Dans ce cadre-là, c'est l'algorithme DIRECT combiné à l'interpolation par splines qui est utilisé (résultats visuels en Fig. 3.11).

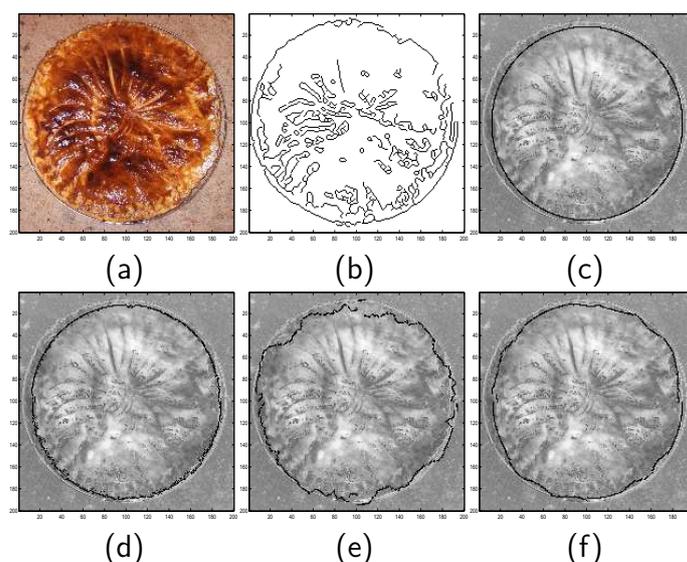


Figure 3.11 – Application à une image 'réelle' : (a) Image à traiter, (b) Opérateur Canny, (c) Initialisation, (d) Gradient, (e) GVF, (f) DIRECT et interpolation par spline.

3.5 Rappels concernant ma thèse : conclusion

Durant ma thèse, j'ai notamment adapté les modèles et méthodes du traitement d'antenne à divers aspects de la détection de contours. On se rapportera à mon manuscrit [104] pour les autres aspects de ma thèse. J'ai en effet voulu me concentrer sur les travaux qui ont servi de base aux travaux des deux premiers thésards que j'ai encadrés.

A l'origine, c'est M. Aghajan (par ailleurs un membre du jury de ma thèse) qui a proposé de transposer le problème de la caractérisation de contours en un problème de traitement d'antenne [6]. J'ai adapté ce principe au cas de contours distordus [30], puis de contours circulaires éventuellement distordus, par une antenne circulaire et en combinant une méthode d'optimisation (DIRECT) avec l'interpolation par splines [110].

Le tableau 3.1 fait l'analogie entre contours linéaires et circulaires.

	Linéaire	Circulaire
Direction pour la génération de signal	ligne i	\mathbf{D}_i
Paramètres d'initialisation	θ, x_0	r , centre
Décalage de pixel	$\Delta x(i)$	$\Delta \rho(i)$

Table 3.1 – Contours approximativement linéaires et circulaires distordus

Les méthodes proposées pour l'estimation des distortions sont limitées par le

temps de calcul et le principe de l'interpolation si le contour à retrouver est très distordu. Notamment, les contraintes de régularité imposées à l'interpolation par splines empêchent le contour retrouvé de présenter de fortes concavités. C'est pourquoi j'ai souhaité aborder ce problème en début de carrière de MCF. Ce sera l'objet de la méthode résumée au chapitre 4, qui a fait l'objet d'une publication avec le premier doctorant que j'ai encadré [64]. Une extension de ces méthodes a aussi consisté à caractériser des contours flous.

4 Caractérisation de contours flous et distordus, application industrielle

Ce chapitre est dédié à des études plutôt théoriques menées dans le cadre de la thèse de Haiping Jiang, et présente aussi une application pour laquelle j'ai proposé une solution pendant mon Post-Doctorat, à savoir un problème de contrôle non-destructif par des méthodes de détection de contours. En section 4.1, je présente le problème de la caractérisation de contours flous, et en section 4.2 la caractérisation de contours très distordus. Ces travaux menés avec le doctorant Haiping Jiang sont dans la continuité directe de mes travaux de thèse, mais aussi de Post-Doctorat, puisque la problématique des contours flous m'a été inspirée par une application considérée pendant mon post-doc en Allemagne. C'est cette application que je décris en section 4.3. Ces travaux ont été publiés dans les articles en revue suivants : [27], [67], [68] ; et les articles en conférences suivants : [66], [65], [103], [101], [117].

4.1 Caractérisation de contours flous

4.1.1 Position du problème

Dans cette sous-section, nous explicitons les modèles que nous adoptons pour les images considérées et les contours flous qu'elles contiennent. Les techniques de génération de signal utilisées ont été présentées au chapitre 3. Soit $I(l, m)$ une image de taille $N \times N$ (Cf Fig. 4.1(a) ou Fig. 4.1(b)). Nous supposons que $I(l, m)$ est composée soit de plusieurs contours flous linéaires, soit d'un contour flou circulaire, et d'un bruit additif uniformément distribué, dont les valeurs de niveau de gris suivent une distribution Gaussienne. Un contour approximativement linéaire est supposé avoir pour orientation principale θ . Nous définissons son offset central x_0 comme la distance entre le coin supérieur gauche et le pixel de niveau de gris maximal sur la première ligne, noté l_{max} (Cf Fig. 4.1(a)). L'étalement du contour est noté σ , et nous définissons le paramètre G tel que $l_{max} = \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}}$. La valeur de G dépend du nombre de bits utilisés pour coder l'image. Quand d contours flous linéaires sont présents, ils sont définis par les paramètres $\{\theta_k, x_{0k}, \sigma_k, k = 1, \dots, d\}$. Un contour approximativement circulaire est supposé avoir un centre de coordonnées $\{l_c; m_c\}$. Les pixels de valeur $\frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ composent un cercle de centre $\{l_c; m_c\}$ et de rayon r_0 . Dans les deux cas les valeurs de niveau de gris décroissent graduellement autour de ce contour central de niveau de gris

$\frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}}$. Les contours flous linéaires ont une largeur $2X_f$. Un contour flou circulaire a pour largeur $2r_f$.

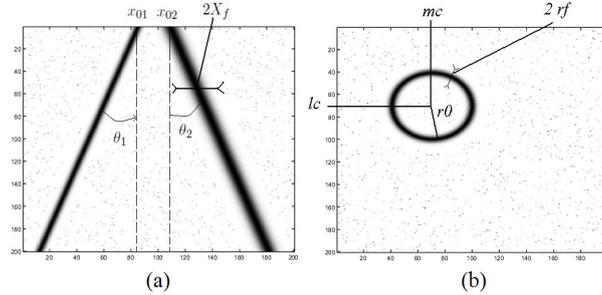


Figure 4.1 – Modèles de contour : (a) contours flous d'orientations principales θ_1 , θ_2 , d'offsets x_{01} et x_{02} , et de largeur $2X_f$; (b) contour flou circulaire caractérisé par le centre $\{l_c; m_c\}$, le rayon r_0 , et la largeur $2r_f$.

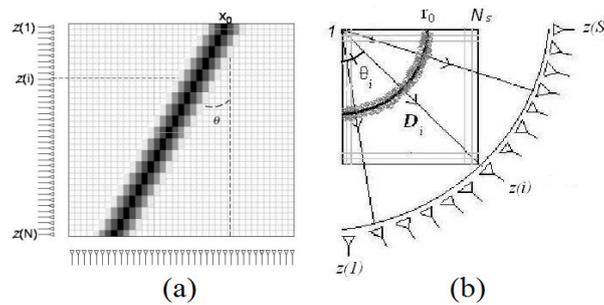


Figure 4.2 – Génération de signal : (a) antenne linéaire pour la génération de $z(1)$, $z(2)$, ..., $z(N)$ sur les côtés gauche et en bas, contour flou d'orientation θ et d'offset x_0 ; (b) sous-image de taille $N_s \times N_s$ antenne circulaire [110] pour la génération de $z(1)$, $z(2)$, ..., $z(S)$ sur chaque direction de génération D_i , quart de contour flou

Le choix de l'antenne est fait en sondant le contenu de l'image grâce à deux antennes linéaires : elles sont placées sur le côté gauche, ou le côté bas de l'image. Un signal est généré sur ces antennes selon la technique présentée au chapitre 3, puis on applique un seuil à ces signaux, afin de s'affranchir du bruit. On part du principe que, quand les deux signaux reçus sur les deux antennes présentent des portions non nulles aux bords, des cercles sont présents. Dans ce cas-là, les milieux des sections non-nulles donnent les coordonnées l_c et m_c des centres des cercles. Si l'un des signaux présente des section nulles en ses bords, une ligne horizontale est présente. Si aucune des deux antennes ne présente de section nulle, une ligne diagonale est présente.

La Fig. 4.2(b) montre une partie de la Fig. 4.1(b), qui est sélectionnée pour réaliser la caractérisation de cercle. Le coin en haut à gauche de la Fig. 4.2(b) coïncide avec le centre du contour flou circulaire. L'antenne est composée de S capteurs, chacun étant relié à une position angulaire $\theta_i = \frac{(i-1) \cdot \pi/2}{S}$, et à la direction de génération D_i .

Dans le cas de contours approximativement linéaires c'est une antenne linéaire qui est choisie et qui conduit à une composante de signal par ligne de l'image, pour former le vecteur : $\mathbf{z} = [z(1), z(2), \dots, z(N)]^T$.

4.1.2 Modèles de signaux pour les contours flous

Dans cette sous-section, nous calculons les modèles de signaux pour les contours linéaires et circulaires flous, en montrant qu'ils sont très proches. Pour cela un modèle de la variation des niveaux de gris est requis en premier lieu. Nous supposons que les valeurs de niveaux de gris $I(l, m)$ évoluent le long d'une position centrale comme une fonction exponentielle du décalage par rapport à cette position (Cf Fig. 4.1(a) et Fig. 4.1(b)). Pour les contours linéaires :

$$I(l, m) = \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.1)$$

où $x = m - (x_0 - (l - 1)\tan(\theta))$. Pour les contours circulaires :

$$I(l, m) = \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\sqrt{(l-l_c)^2 + (m-m_c)^2} - r_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.2)$$

D'après les Eqs. (4.1) et (4.2), $\frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ est la valeur de niveau de gris maximale. Une fonction Gaussienne a été choisie de façon à faciliter les calculs ultérieurs, qui impliquent des exponentielles complexes.

Contour flou linéaire

• Premièrement, nous supposons que l'image contient seulement un contour flou de largeur $2X_f$, d'orientation principale θ , d'offset x_0 , et d'étalement σ . En se référant aux Eqs. (3.1) et (4.1), le signal généré sur le $i^{\text{ème}}$ capteur est exprimé par :

$$\begin{aligned} z(i) &= \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{x=1}^{X_f} e^{-j\mu(x_0+x-(i-1)\tan(\theta))} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \\ &+ \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{x=1}^{X_f} e^{-j\mu(x_0-x-(i-1)\tan(\theta))} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \\ &+ \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-j\mu(x_0-(i-1)\tan(\theta))} \end{aligned} \quad (4.3)$$

C'est-à-dire :

$$\begin{aligned} z(i) &= \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} \sum_{x=-X_f}^{X_f} e^{-j\mu(x_0+x-(i-1)\tan(\theta))} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \\ &= \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-j\mu x_0} e^{j\mu(i-1)\tan(\theta)} \sum_{x=-X_f}^{X_f} e^{-j\mu x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Si σ est suffisamment petit comparé au nombre de colonnes dans l'image, nous pouvons transformer ce calcul de somme en un calcul d'intégrale. L'idée derrière cette approximation est que les valeurs du terme $e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ décroissent rapidement quand x croît, c'est-à-dire, quand on s'éloigne des pixels dont la valeur de niveau de gris est $\frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}}$. Ainsi la somme entre $-X_f$ et X_f peut être assimilée à une somme entre $-\infty$ et $+\infty$. Une étude détaillée de cette approximation est proposée dans [63] pour les contours flous circulaires. L'Eq. (4.4) devient :

$$\begin{aligned} z(i) &\approx \\ &\frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-j\mu x_0} e^{j\mu(i-1)\tan(\theta)} \int_{x=-\infty}^{+\infty} e^{-j\mu x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx \end{aligned} \quad (4.5)$$

Une formule générale fournit l'égalité suivante :

$$\int_{x=-\infty}^{+\infty} e^{-ax^2+jbx} dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{b^2}{4a}} \quad (4.6)$$

En se référant à l'Eq. (4.6), il est facile d'exprimer l'Eq. (4.5) par :

$$z(i) = G e^{-j\mu x_0} e^{j\mu(i-1)\tan(\theta)} e^{-\frac{\mu^2 \sigma^2}{2}} \quad (4.7)$$

L'Eq. (4.7) décrit le signal reçu sur le $i^{\text{ème}}$ capteur si un contour flou est présent.

- Deuxièmement, nous considérons le cas où l'image contient :
 - d contours flous, d'orientations θ_k , d'offsets x_{0k} , et d'étalement σ_k ($k = 1, \dots, d$);
 - un bruit uniformément distribué dont les valeurs suivent une loi Gaussienne.

L'expression des signaux reçus par le $i^{\text{ème}}$ capteur devient :

$$z(i) = G \sum_{k=1}^d e^{-j\mu x_{0k}} e^{j\mu(i-1)\tan(\theta_k)} e^{-\frac{\mu^2 \sigma_k^2}{2}} + n(i) \quad (4.8)$$

où $n(i)$ est un terme de bruit dû à la présence de pixels de bruit dans l'image. Il a été montré que ce bruit, présent dans le signal généré, suit une loi Gaussienne [6]. Nous notons que quand σ tend vers 0, l'Eq. (4.8) est égale à l'équation obtenues dans le cas d'un contour classique d'un pixel de largeur. Les composantes de signal dans l'Eq. (4.8) suivent un modèle du traitement d'antenne, impliquant

l'amplitude de sources, et des vecteurs de 'déphasage', autrement dit d'orientation. L'Eq. (4.8) peut être exprimée ainsi :

$$z(i) = \sum_{k=1}^d s(k)c_i(\theta_k) + n(i) \quad (4.9)$$

Pour cela nous définissons pour le $k^{\text{ème}}$ contour :

1. L'amplitude de source :

$s(k) = \frac{G}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-j\mu x_{0k}} \sum_{x=-X_f}^{X_f} e^{-j\mu x} e^{-\frac{x^2}{2\sigma k^2}}$, $k = 1, \dots, d$. Quand l'approximation continue est valable, les composantes d'amplitude sont exprimées par :

$$s(k) = G e^{-j\mu x_{0k}} e^{-\frac{\mu^2 \sigma k^2}{2}} \quad (4.10)$$

2. le vecteur d'orientation :

$\mathbf{c}(\theta_k) = [c_1(\theta_k), c_2(\theta_k), \dots, c_N(\theta_k)]^T$, with $c_i(\theta_k) = e^{j\mu(i-1)\tan(\theta_k)}$.

Sous forme matricielle, nous obtenons :

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}(\theta)\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.11)$$

où $\mathbf{C}(\theta) = [\mathbf{c}(\theta_1), \mathbf{c}(\theta_2), \dots, \mathbf{c}(\theta_d)]^T$, et $\mathbf{s} = [s(1), s(2), \dots, s(d)]^T$, et $\mathbf{n} = [n(1), n(2), \dots, n(S)]^T$.

Extension au contour circulaire flou

Dans le cas de contours circulaires flous, nous avons montré dans [63] que nous obtenons un modèle de signal du traitement d'antenne si, au lieu du paramètre fixe μ , nous choisissons un paramètre qui dépend de l'indice du capteur $\mu = \alpha(i-1)$, où α est une constante. Comme nous l'avons montré dans [63], un contour flou circulaire d'étalement σ suffisamment petit conduit aux composantes de signal suivantes :

$$z(i) = \exp(-j\alpha(i-1)r_0) \exp\left(-\frac{\sigma^2 \alpha^2 (i-1)^2}{2}\right). \quad (4.12)$$

Nous remarquons que, contrairement à l'Eq. (4.7) qui concernait les contours linéaires, l'Eq. (4.12) contient un terme quadratique, qui est le module de chaque composante de signal. Si nous tenons compte du bruit, et définissons les termes $z'(i)$ tels que :

$$z'(i) = \frac{z(i)}{|z(i)|} = \exp(-j\alpha(i-1)r_0) + n(i) \quad (4.13)$$

nous obtenons l'expression suivante :

$$\mathbf{z}' = \mathbf{c}(r_0) + \mathbf{n} \quad (4.14)$$

avec $\mathbf{z}' = [z'(1), \dots, z'(S-1)]^T$, $\mathbf{c}(r_0) = [1, \exp(-j\alpha r_0), \dots, \exp(-j\alpha(S-1)r_0)]^T$, et $\mathbf{n} = [n(1), \dots, n(S-1)]^T$ étant le vecteur bruit. Dans la suite, nous proposons un modèle commun aux contours linéaires et circulaires flous.

Modèle de signal commun

Les notations ci-dessus permettent d'exprimer le signal généré à partir de l'image sous forme matricielle :

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}(\iota)\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.15)$$

où :

$\mathbf{z} = [z(1), z(2), \dots, z(N_S)]^T$,
et $\mathbf{C}(\iota) = [\mathbf{c}(\iota_1), \mathbf{c}(\iota_2), \dots, \mathbf{c}(\iota_d)]$. Dans le cas de contour linéaires, $N_S = N$, et dans le cas de contours circulaires, $N_S = S$. Le vecteur $\mathbf{n} = [n(1), n(2), \dots, n(N_S)]^T$ représente le bruit. Pour les contours linéaires flous, $\mathbf{s} = [s(1), s(2), \dots, s(d)]^T$, et $\mathbf{C}(\iota) = \mathbf{C}(\theta)$. Pour les contours circulaires flous, \mathbf{s} est un scalaire : $\mathbf{s} = 1$, and $\mathbf{C}(\iota) = \mathbf{c}(r_0)$.

4.1.3 Méthodes par sous-espaces pour l'estimation de paramètres de contours flous

Dans cette sous-section, nous adaptons les méthodes par sous-espace venues du traitement d'antenne pour estimer les paramètres caractérisant les contours flous. Premièrement, nous considérons les contours linéaires : une méthode par sous-espaces et un traitement dans l'espace de Fourier donnent les valeurs d'orientation et d'offset $\{\theta_k, x_{0k}, k = 1, \dots, d\}$. Deuxièmement, nous considérons les contours circulaires : une méthode par sous-espace donne la valeur de rayon r_0 .

Contours flous linéaires

Nous adaptons une méthode par sous-espace pour estimer la valeur d'orientation, et un traitement dans l'espace de Fourier pour estimer la valeur d'offset.

• Estimation de l'orientation

L'Eq. (4.15) correspond exactement à un modèle de traitement d'antenne [149]. Ainsi, nous pouvons adapter une méthode haute résolution issue du traitement d'antenne telle MUSIC [149], mais il faut simuler au préalable et artificiellement la présence de plusieurs réalisations de signal. Pour cela, nous divisons l'antenne (de taille N) en plusieurs sous-antennes (de taille M) qui se recouvrent. Nous disposons de $P = N - M + 1$ réalisations. En les groupant, nous obtenons la matrice suivante :

$$\mathbf{Z}_P = [\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_P] \quad (4.16)$$

La matrice de covariance de ces P sous-vecteurs est définie par :

$$\mathbf{R}_{zz} = \mathbf{Z}_P \mathbf{Z}_P^H \quad (4.17)$$

Un critère statistique de type MDL (Minimum Description Length), appliqué à \mathbf{R}_{zz} , fournit le nombre de valeurs propres dominantes de \mathbf{R}_{zz} , égal au nombre de contours d [6]. Nous estimons les paramètres θ_k , $k = 1, \dots, d$ via les maxima du pseudo-spectre $F(\theta)$ [149] :

$$F(\theta) = \frac{1}{\|\mathbf{c}^H(\theta) \cdot \mathbf{U}_2\|^2} \quad (4.18)$$

où $\mathbf{c}(\theta)$ un est modèle paramétrique (dépendant du paramètre θ) pour les vecteurs portant le sous-espace signal : $\mathbf{c}(\theta) = [c_1(\theta), c_2(\theta), \dots, c_M(\theta)]^T$, avec $c_i(\theta) = e^{j\mu(i-1)\tan(\theta)}$. Les colonnes de la matrice \mathbf{U}_2 engendrent le sous-espace bruit : \mathbf{U}_2 est composée des $M - d$ colonnes de \mathbf{R}_{zz} associées aux $M - d$ plus petites valeurs propres.

• **Estimation de l'offset du contour flou**

On dispose maintenant des valeurs d'orientation. L'estimation des offsets se fait en deux étapes : une estimation grossière puis une estimation raffinée. Lors de l'estimation grossière, on considère que les valeurs d'étalement sont suffisamment petites pour que le terme en exponentielle correspondant soit égal à 1. Nous posons $\mu = \alpha(i - 1)$. L'Eq. (4.8) devient :

$$z(i) = G \Sigma + n(i) \quad (4.19)$$

avec $\Sigma =$

$$\sum_{k=1}^d e^{-j\alpha(i-1)x_{0k}} e^{j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_k)} e^{-\frac{(\alpha(i-1))^2 \sigma_k^2}{2}}$$

Alors, chaque contour est considéré successivement. Par exemple, pour l'orientation θ_1 : cette valeur ayant été estimée, nous pouvons diviser $z(i)$ par le terme $e^{j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_1)}$. Nous obtenons :

$$w(i) = z(i) / e^{j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_1)} = G e^{-j\alpha(i-1)x_{01}} e^{-\frac{(\alpha(i-1))^2 \sigma_1^2}{2}} + n'(i) \quad (4.20)$$

où $n'(i)$ est un terme de bruit qui résulte des pixels de bruit et de tous les contours sauf celui d'indice $k = 1$. A ce point, la valeur de σ_1 n'est pas connue et nous proposons une approximation qui permet d'obtenir une valeur grossièrement estimée de x_{01} , sans la connaissance *a priori* de σ_1 . Si le paramètre de propagation α est choisi de sorte que $\alpha(i - 1) \ll 1$, $\forall i = 1, \dots, N$, nous pouvons considérer

en première approximation que :

$$w(i) \approx \mathbf{w}(i) = G e^{-j\alpha(i-1)x_{01}} + n(i) \quad (4.21)$$

Le signal $\tilde{\mathbf{w}} = [w(1), w(2), \dots, w(N)]^T$ peut être analysé par transformée de Fourier, ce qui conduit à la valeur d'offset estimée \hat{x}_{01} :

$$\hat{x}_{01} = \underset{x_{01}}{\operatorname{argmax}}(\|FT(\tilde{\mathbf{w}})\|) \quad (4.22)$$

où FT vaut pour 'Transformée de Fourier'. Le terme argmax signifie que nous cherchons la valeur de x_{01} qui maximise $\|FT(\tilde{\mathbf{w}})\|$. La division dans l'Eq. (4.30) et l'analyse de Fourier en Eq. (4.22) sont répétées pour chaque valeur de $k = 1, \dots, d$. L'analyse de Fourier est rapide et simple à implanter. A ce point, nous avons à notre disposition une estimée grossière des valeurs d'offset, qui sera utilisée pour estimer à son tour l'étendue σ_k , $k = 1, \dots, d$. La façon dont ce sera fait est l'objet de la sous-section 4.1.4. Admettons que les valeurs d'étendue soient à notre disposition, et passons-nous maintenant de l'approximation de l'Eq. (4.21).

En partant de l'expression de $w(i)$ dans l'Eq. (4.30), nous calculons le signal $\omega(i)$, $i = 1, \dots, d$:

$$\begin{aligned} \omega(i) &= w(i) / (e^{-\frac{(\alpha(i-1))^2 \sigma_1^2}{2}}) \\ &= G e^{-j\alpha(i-1)x_{01}} + n'(i) \end{aligned} \quad (4.23)$$

où $n'(i)$ est un terme de bruit résultant de l'influence de tous les contours hormis le premier. Les composantes de signal $\omega(i)$ forment le vecteur signal $\boldsymbol{\omega} = [\omega(1), \omega(2), \dots, \omega(N)]^T$ qui peut être analysé dans le domaine de Fourier pour aboutir à une estimée \hat{x}_{01} de la valeur d'offset :

$$\hat{x}_{01} = \underset{x_{01}}{\operatorname{argmax}}(\|FT(\boldsymbol{\omega})\|) \quad (4.24)$$

La division effectuée dans les Eqs. (4.30) et (4.23) est appliquée d fois, c'est-à-dire, pour chaque contour, pour obtenir une estimée raffinée des valeurs \hat{x}_{0k} , $k = 1, \dots, d$.

Contours flous circulaires : estimation du rayon

A ce point les coordonnées du centre $\{l_c; m_c\}$ sont connues (Cf sous-section 4.1.1). En examinant l'Eq. (4.14), nous remarquons que le problème de l'estimation du rayon est similaire à l'estimation d'harmoniques dans divers domaines applicatifs du traitement du signal (radar, sonar, communications). Il s'agit ici d'une seule exponentielle complexe avec une amplitude unitaire et la valeur sui-

vante de fréquence :

$$f = -\alpha r_0 / 2\pi \quad (4.25)$$

La méthode MFBLP, qui a été présentée précédemment dans ce manuscrit (Cf section 3.2 du chapitre 3), est appropriée pour résoudre un tel problème. Nous l'adaptions au signal \mathbf{z}' (Cf Eq. (4.14)) pour estimer les valeurs de rayon. Pour réduire la charge de calcul dédiée à l'estimation du rayon, et si un cercle seulement est présent, la transformée de Fourier peut aussi être utilisée.

4.1.4 Algorithme d'optimisation pour l'estimation de l'étalement des contours flous

Dans cette sous-section, nous proposons des critères des moindres carrés qui impliquent les signaux générés et le modèle de signal de l'Eq. (4.15). L'algorithme d'optimisation que nous mettons en oeuvre doit permettre d'estimer au mieux le paramètre d'étalement σ . Il peut y avoir plusieurs contours linéaires, mais on se restreint au cas où il n'y a qu'un seul contour circulaire : c'est la seule façon d'avoir un modèle de signal à phase linéaire dans l'Eq. (4.13).

Contours linéaires

Les valeurs d'orientation de contour estimées par MUSIC sont utilisées pour construire la matrice des déphasages $\mathbf{C}(\theta)$ (Cf Eq. (4.15)). Le vecteur source \mathbf{s} dépend non seulement des valeurs d'offset x_{0k} ($k = 1, \dots, d$), mais aussi des valeurs d'étalement σ_k ($k = 1, \dots, d$). Donc nous proposons d'estimer les composantes du vecteur source \mathbf{s} , par la minimisation du critère suivant :

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{\mathbf{s}}{\operatorname{argmin}}(\|\mathbf{z} - \mathbf{C}\mathbf{s}\|^2) \quad (4.26)$$

où $\|\cdot\|$ représente la norme induite par le produit scalaire dans \mathbb{C}^N (on peut utiliser la norme de Frobenius). Comme on l'a dit précédemment dans le manuscrit, le bruit qui apparaît lors de la génération du signal est Gaussien [6]. Ainsi, minimiser un critère des moindres carrés entre signal généré et modèle doit conduire à la solution optimale au sens du maximum de vraisemblance. Voici pour rappel la relation entre les composantes du vecteur source et les paramètres d'étalement (voir aussi l'Eq. (4.10)) :

$$s(k) = f(\sigma_k) = G e^{-j\mu x_{0k}} e^{-\frac{\mu^2 \sigma_k^2}{2}} \quad (4.27)$$

On note $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, \dots, \sigma_d]^T$ le vecteur contenant toutes les valeurs d'étalement, et $\mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}) = [f(\sigma_1), \dots, f(\sigma_d)]^T = [s(1), \dots, s(d)]^T$ le vecteur source. On note $\hat{\boldsymbol{\sigma}} = [\hat{\sigma}_1, \dots, \hat{\sigma}_d]^T$ le vecteur contenant les valeurs estimées des étalements. Des Eqs.

(4.26) et (4.27), nous obtenons :

$$\hat{\sigma} = \underset{\sigma}{\operatorname{argmin}}(\|z - \mathbf{C}\mathbf{f}(\sigma)\|^2) \quad (4.28)$$

Il s'agit donc du problème d'optimisation suivant :

$$\hat{\sigma} = \underset{\sigma}{\operatorname{argmin}}(J_{\text{line}}(\sigma)) \quad (4.29)$$

où J_{line} est le critère à minimiser. Pour résoudre l'Eq. (4.28) et minimiser J_{line} , nous avons mis en oeuvre la méthode DIRECT [69]. En fin de processus on obtient $\hat{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_d]^T$. En sous-section 4.1.3, nous avons dû faire une approximation pour pouvoir estimer les valeurs d'offset. Celles-ci peuvent maintenant être estimées de façon plus rigoureuse, pour conduire à la version 'raffinée' de l'estimée évoquée en sous-section 4.1.3. En effet si nous connaissons les valeurs d'étalement nous pouvons reprendre l'Eq. (4.30) :

$$w(i) = z(i) / e^{j\alpha(i-1)^2 \tan(\theta_1)} = G e^{-j\alpha(i-1)x_{01}} e^{-\frac{(\alpha(i-1))^2 \sigma_1^2}{2}} + n'(i) \quad (4.30)$$

et, par exemple pour $k = 1$, diviser $w(i)$ par $e^{-\frac{(\alpha(i-1))^2 \sigma_1^2}{2}}$, ce qui conduit à : $w'(i) = G e^{-j\alpha(i-1)x_{01}} + n''(i)$ où $n''(i)$ est un terme de bruit qui n'est plus forcément Gaussien. Néanmoins les composantes $w'(i)$ suivent strictement un modèle de signal à phase linéaire que l'on peut analyser pour obtenir une estimation raffinée de l'offset x_{01} . On peut faire de même pour les autres contours d'indice $k = 1, \dots, d$ en divisant successivement les composantes de signal $z(i)$ par le terme dépendant de l'orientation et le terme dépendant de l'étalement.

Extension au cas d'un contour circulaire flou

Nous proposons d'exploiter le signal $\mathbf{z} = [z(1), z(2), \dots, z(S)]^T$ dont les composantes $z(i)$ sont définies en Eq. (4.12). La valeur de r_0 est connue à ce point, et peut être utilisée pour obtenir les composantes de signal $z''(i)$ définies comme suit : $z''(i) = z(i) / \exp(-j\alpha(i-1)r_0)$. Notons $\mathbf{z}''_{\text{model}}$ le signal dont les composantes sont définies par $z''_{\text{model}}(i) = \exp(-\frac{\sigma^2 \alpha^2 (i-1)^2}{2})$, et notons $\mathbf{z}''_{\text{image}}$ le signal dont les composantes sont définies par $z''_{\text{image}}(i) = z(i) / \exp(-j\alpha(i-1)r_0)$. Notre objectif est maintenant d'obtenir une estimation de la valeur d'étalement σ en comparant notre modèle de signal au signal généré à partir de l'image :

$$\hat{\sigma} = \underset{\sigma}{\operatorname{argmin}}(\|\mathbf{z}''_{\text{image}} - \mathbf{z}''_{\text{model}}\|^2) \quad (4.31)$$

soit :

$$\hat{\sigma} = \underset{\sigma}{\operatorname{argmin}}(J_{\text{circle}}(\sigma)) \quad (4.32)$$

où J_{circle} est le critère à minimiser. Contrairement au cas des contours linéaires considéré plus haut, la méthode DIRECT ne semble pas applicable. D'après nos expériences, elle n'aboutit pas aux valeurs attendues, peut-être parce que le critère à minimiser ne constitue pas une fonction k-Lipschitzienne de σ . Nous avons adapté la méthode de Nelder-Mead. En effet elle présente des risques de non-convergence dans des problèmes en dimension 2, mais pas forcément en dimension 1 [84, 47], ce qui est le cas pour notre application.

4.1.5 Quelques résultats

Nous considérons une image incluant deux contours linéaires, avec deux valeurs d'étalement différentes (Cf Fig. 4.3). L'image est de taille 400×400 . L'offset central est $x_{01} = 200$ et $x_{02} = 170$ respectivement, l'orientation $\theta_1 = -18^\circ$ et $\theta_2 = 18^\circ$ respectivement. Les valeurs d'étalement sont $\sigma_1 = 8$ et $\sigma_2 = 1$.

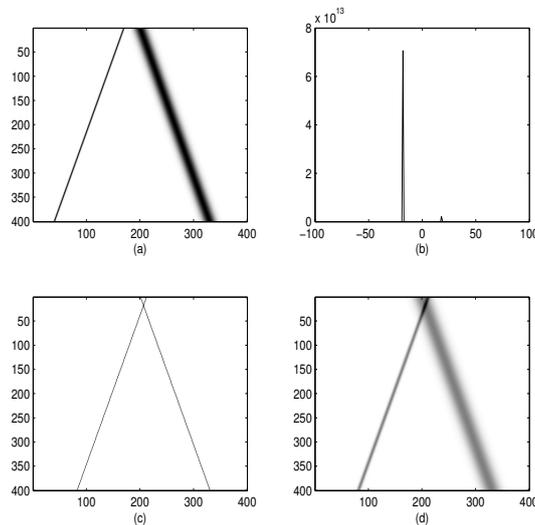


Figure 4.3 – Contour flou linéaire : (a) image traitée avec un contour flou et un contour de largeur 1 pixel ; (b) pseudo-spectre de MUSIC ; (c) contours centraux ; (d) resultat final

Les valeurs estimées d'orientation des contours flous sont $\hat{\theta}_1 = -18^\circ$ et $\hat{\theta}_2 = 18^\circ$. Les valeurs estimées des offsets sont $\hat{x}_{01} = 200.5$ et $\hat{x}_{02} = 211$ pixels. Les valeurs estimées d'étalement sont $\hat{\sigma}_1 = 10.9$ et $\hat{\sigma}_2 = 2.4$. La Fig 4.3(b) montre que le contour de largeur 1 pixel est à peine détecté par MUSIC. L'influence dominante du contour le plus flou dans le processus de génération de signal de l'Eq. (4.16) explique aussi le biais obtenu sur la valeur d'offset du contour de largeur 1 pixel. On présente un résultat sur une image de taille 200×200 pixels (Cf Fig. 4.4), contenant un cercle flou. Les conditions expérimentales et les valeurs attendues pour le contour flou circulaire sont comme suit : les coordonnées du centre sont

$\{l_c, m_c\} = \{70, 60\}$; le rayon est $r_0 = 45$ pixels; l'étalement est $\sigma = 5$. Les méthodes proposées conduisent aux valeurs estimées suivantes : $\{\widehat{l}_c, \widehat{m}_c\} = \{70, 60\}$, $\widehat{r}_0 = 45.4$ pixels, et $\widehat{\sigma} = 5.6$. La méthode Chan et Vese a été utilisée comme méthode comparative. Comme prévu, elle parvient à délimiter les frontières du contour flou (Cf Fig. 4.4). Cependant, elle ne permet pas de caractériser le flou en estimant les paramètres qui le caractérisent comme le fait notre méthode.

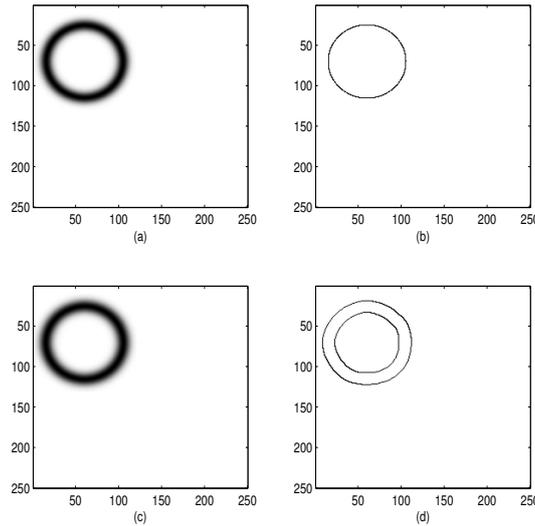


Figure 4.4 – Contour flou circulaire : (a) image à traiter ; (b) cercle d'initialisation ; (c) resultat final ; (d) Chan et Vese

4.2 Caractérisation de contours étoilés très distordus

4.2.1 Méthodologie

Dans cette section, nous considérons des contours étoilés très distordus. L'objectif ici est d'estimer les caractéristiques des oscillations d'un contour, non pas par une méthode d'optimisation comme cela a été expliqué en section 3.4 du Chapitre 3, mais par une méthode déterministe d'estimation de paramètres. Nous nous limitons au cas des contours étoilés. D'un côté, cela limite notre champ d'investigation car pour une valeur d'angle dans un repère de coordonnées polaires, il ne doit exister qu'un seul pixel de contour à caractériser. D'un autre côté, l'amplitude des distortions peut être aussi élevée que le permet le nombre de pixels dans l'image. On commence par générer un signal à partir de l'image, sur une antenne circulaire de capteurs virtuels. Cependant, la formule de génération est différente de celle présentée en section 3.3 du Chapitre 3 (Eq. (3.9)).

Formulation du problème

Nous supposons qu'un contour étoilé est présent dans une image I de pixels $I_{l,m}$ et de taille $N \times N$ recorded image (Cf Fig. 4.5). Le plus simple des contours étoilés est le cercle. Le centre du cercle est supposé être en (l_c, m_c) , et le rayon du cercle est noté r . Pour une image binaire qui ne contient que le contour à retrouver, $I_{l,m} = 1$ sur le contour, et $I_{l,m} = 0$ sinon. Pour un capteur indicé par i , une composante de signal est générée selon la direction D_i comme suit :

$$z_i = \sum_{l=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{N_s} I_{l,m} \sqrt{l^2 + m^2}, \quad i = 1, \dots, S \quad (4.33)$$

où N_s est le nombre maximum de lignes ou colonnes dans le quart d'image que l'on a sélectionné comme en section 3.3. Les composantes de signal forment le vecteur $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_S]^T$.

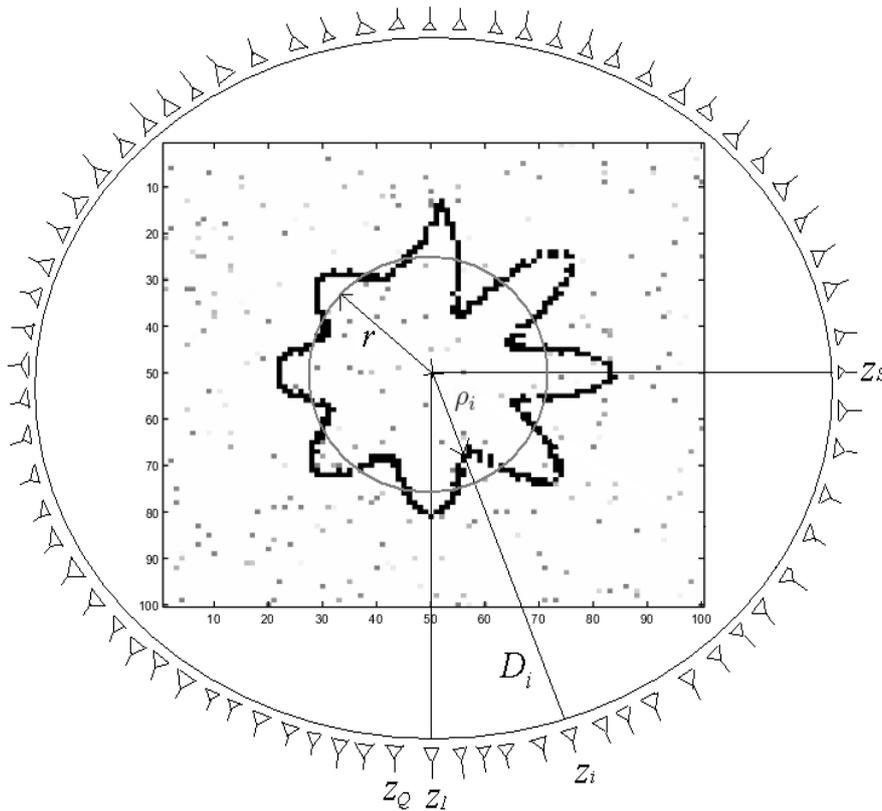


Figure 4.5 – Modèle pour une image contenant un contour étoilé très distordu

La méthode présentée en sous-section 3.3.3 peut être utilisée pour estimer les coordonnées du centre (l_c, m_c) . Quand un seul contour circulaire de rayon r est présent, les composantes de signal ont pour expression :

$$z_i = r, \quad i = 1, \dots, S \quad (4.34)$$

Quand un contour approximativement circulaire distordu est présent, les composantes de signal ont pour expression :

$$z_i = r + \Delta\rho(i), \quad i = 1, \dots, S \quad (4.35)$$

Dans le reste de cette section, on redéfinit la notation $\Delta\rho(i)$ en x_i , $i = 1, \dots, Q$, pour faciliter la lecture. A partir des signaux $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_Q]^T$ de l'Eq. (4.35), nous souhaitons estimer le rayon r , et les oscillations x_i , $i = 1, \dots, Q$, en particulier pour des contours présentant de fortes concavités. Sans perte de généralité, nous définissons r comme la valeur moyenne des composantes de signal z_i $i = 1, \dots, Q$. r est estimé par :

$$r = \bar{z} \quad (4.36)$$

où \bar{z} est une moyenne sur les composantes de \mathbf{z} définie par : $\bar{z} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S z_i$. Alors, nous pouvons calculer :

$$x_i = z_i - r, \quad i = 1, \dots, Q \quad (4.37)$$

Les valeurs x_i , $i = 1, \dots, Q$ sont exactement égales aux oscillations du contour, quand l'image n'est pas entâchée de bruit. Si l'image est dégradée par un bruit additif uniformément distribué, le calcul de l'Eq. (4.37) fournit des composantes de signal x_i , $i = 1, \dots, Q$ qui sont perturbées par un bruit aléatoire. Ainsi, nous cherchons une méthode d'estimation qui retrouve les oscillations de contours aux concavités qui peuvent être élevées, et qui soit robuste au bruit. Pour cela, nous proposerons un modèle pour les oscillations x_i , $i = 1, \dots, Q$. Nous adapterons une méthode avancée d'estimation de sinusoides amorties pour caractériser les oscillations, en accord avec le modèle de contour proposé.

Modèle d'oscillations

Nous adoptons un modèle de sinusoides amorties multiples : K signaux sinusoidaux avec chacun une amplitude, une fréquence, et un facteur d'amortissement associé. Le modèle choisi est donc le suivant :

$$x_i = \sum_{k=1}^{2K} a_k e^{j\phi_k} e^{(-d_k + j\omega_k)(i-1)} = \sum_{k=1}^{2K} c_k w_k^{(i-1)}, \quad i = 1, \dots, Q \quad (4.38)$$

Dans l'Eq. (4.38), x_i représente l'amplitude d'oscillation pour $i = 1, \dots, Q$, a_k est l'amplitude de la $k^{\text{ème}}$ sinusoides amortie, d_k le facteur d'amortissement, ω_k la pulsation, et ϕ_k son déphasage. Notons que d_k peut être négatif. Dans ce cas,

l'amplitude de la $k^{\text{ème}}$ sinusoïde augmente avec i . $c_k = a_k e^{j\phi_k}$ est l'amplitude complexe de la $k^{\text{ème}}$ sinusoïde, et on note $w_k = e^{(-d_k + j\omega_k)}$.

Le signal observé $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_Q]^T$ est entièrement caractérisé par les paramètres $a_k, d_k, \omega_k, \phi_k, k = 1, \dots, 2K$. Le nombre K de sinusoïdes amorties peut être estimé par un critère statistique de type MDL [161].

Nous choisissons d'utiliser une méthode par sous-espaces qui est adaptée aux sinusoïdes amorties [37]. Une variante est décrite de façon succincte dans [62] pour des signaux courts. Premièrement, nous réarrangeons le signal \mathbf{x} en sous-signaux dans une matrice de Hankel de taille $L \times M$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_M \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{M+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & \dots & x_Q \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

où L, K , et Q sont reliés par : $L \geq 2K, M \geq 2K$ et $Q = L + 2K - 1$.

Ensuite, on applique une décomposition de Vandermonde :

$$\mathbf{X} \stackrel{\text{VD}}{=} \mathbf{S} \mathbf{C} \mathbf{T}^T,$$

où $(\cdot)^T$ vaut pour transposée,

$\mathbf{C} = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_{2K})$,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_{2K}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1^{L-1} & w_2^{L-1} & \dots & w_{2K}^{L-1} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_{2K}^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1^{M-1} & w_2^{M-1} & \dots & w_{2K}^{M-1} \end{bmatrix}.$$

La relation qui existe entre les colonnes de \mathbf{S} permet d'écrire :

$$\mathbf{S}^L = \mathbf{S}^F \mathbf{Z}, \quad (4.40)$$

où \mathbf{S}^L est une matrice contenant toutes les lignes de \mathbf{S} sauf la première, et \mathbf{S}^F est une matrice contenant toutes les lignes de \mathbf{S} sauf la dernière. \mathbf{Z} est une matrice diagonale dont les termes non-nuls dépendent des paramètres à estimer. En calculant une décomposition en valeurs singulières (singular value decomposition ou SVD), \mathbf{X} peut être décomposée en :

$$\mathbf{X} \stackrel{\text{SVD}}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^H \\ \mathbf{V}_2^H \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

où $(\cdot)^H$ est la transposée conjuguée, Σ_1 contient les $2K$ plus grandes valeurs singulières de \mathbf{X} et Σ_2 les $L - 2K$ valeurs singulières restantes de \mathbf{X} . Les matrices \mathbf{U}_1 et \mathbf{V}_1^H contiennent les $2K$ premiers vecteurs singuliers gauche et droite, et leur taille est $L \times 2K$ et $M \times 2K$, respectivement. Comme le rang de \mathbf{X} est $2K$, toutes les valeurs de Σ_2 sont nulles. Donc, nous pouvons exprimer \mathbf{X} comme :

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}_1 \Sigma_1 \mathbf{V}_1^H, \quad (4.42)$$

et nous obtenons les équations suivantes à partir de l'Eq. (4.40) par changement de base.

$$\mathbf{U}_1^F \mathbf{Z}^u = \mathbf{U}_1^L \quad (4.43)$$

où \mathbf{U}_1^F contient toutes les lignes de \mathbf{U}_1 sauf la dernière, \mathbf{U}_1^L contient toutes les lignes de \mathbf{U}_1 sauf la première, et \mathbf{Z}^u est une matrice semblable à \mathbf{Z} (elles ont les mêmes valeurs propres).

Une méthode des moindres carrés donne :

$$\mathbf{Z}^u = (\mathbf{U}_1^F)^\dagger \mathbf{U}_1^L \quad (4.44)$$

où $(\cdot)^\dagger$ signifie pseudo-inverse.

Les facteurs d'amortissement d_k et les fréquences ω_k ($k = 1, \dots, 2K$) du modèle en Eq. (4.38) sont estimées à partir des valeurs propres de \mathbf{Z}^u . Ensuite nous substituons ces valeurs estimées de d_k et ω_k dans l'Eq. (4.38) et nous calculons une solution des moindres carrés. Finalement, l'amplitude a_k et le déphasage ϕ_k de chaque sinusoïde est déterminé à partir de c_k (il s'agit du module et de la phase). Les paramètres estimés nous permettent de reconstruire parfaitement les oscillations puis le contour : les coordonnées des pixels sont données par :

$$\rho_i = r + \hat{x}_i, \quad i = 1, \dots, Q$$

où \hat{x}_i est l'estimée de x_i , $i = 1, \dots, Q$. en résumé, nous avons estimé les distortions du contour pour tout angle θ_i . Nous avons aussi estimé le rayon r via le calcul d'une moyenne, et la position du centre est estimé via le procédé décrit en sous-section 3.3.3. On connaît maintenant toutes les caractéristiques du contour étoilé.

4.2.2 Résultats

Pour quantifier la précision de la méthode utilisée, nous définissons ME_x , l'erreur moyenne entre les valeurs d'oscillations réelles et les valeurs estimées. Dans certains cas, à cause de l'effet de discrétisation de l'image, le contour n'est pas parfaitement continu. Il a donc été intéressant de tester la robustesse de la méthode à des décalages inattendus de pixels par rapport à un contour idéal, continu. En Fig. 4.6 (a) est présenté un contour étoilé. En Fig. 4.6 (b) est présenté un contour dont on a volontairement décalé certains pixels. L'image a été perturbée par un bruit Gaussien uniforme de valeur moyenne nulle et écart-type

10^{-2} . Si l'on se réfère aux Figs. 4.6 (d)-(i), quand la méthode proposée est utilisée, l'erreur est $ME_x = 1.61$ quand des déplacements faibles sont utilisés ; et $ME_x = 1.86$ quand des déplacements plus importants sont utilisés. En ce qui concerne les méthodes comparatives : la méthode d'optimisation Gradient, appliquée pour estimer les valeurs de décalage comme on l'a fait en 3.4 du Chapitre 3 conduit à $ME_x = 1.78$ et $ME_x = 2.25$. Quand GVF est appliqué, on obtient $ME_x = 1.90$ et $ME_x = 2.42$. Les résultats présentés en Fig. 4.6 montrent donc que la méthode proposée est moins sensible à la présence de décalages que ces deux méthodes comparatives. Cela peut être dû au fait que la méthode proposée traite les signaux générés à partir de l'image de façon globale pour estimer des paramètres valant pour tout le contour, alors que les méthodes comparatives traitent l'information de façon locale, ce qui les rend sensibles à la présence de pixels mal placés ou à des pixels de bruit. On admet cependant que nous sommes très contraints par le modèle de contour en somme de sinusoides amorties.

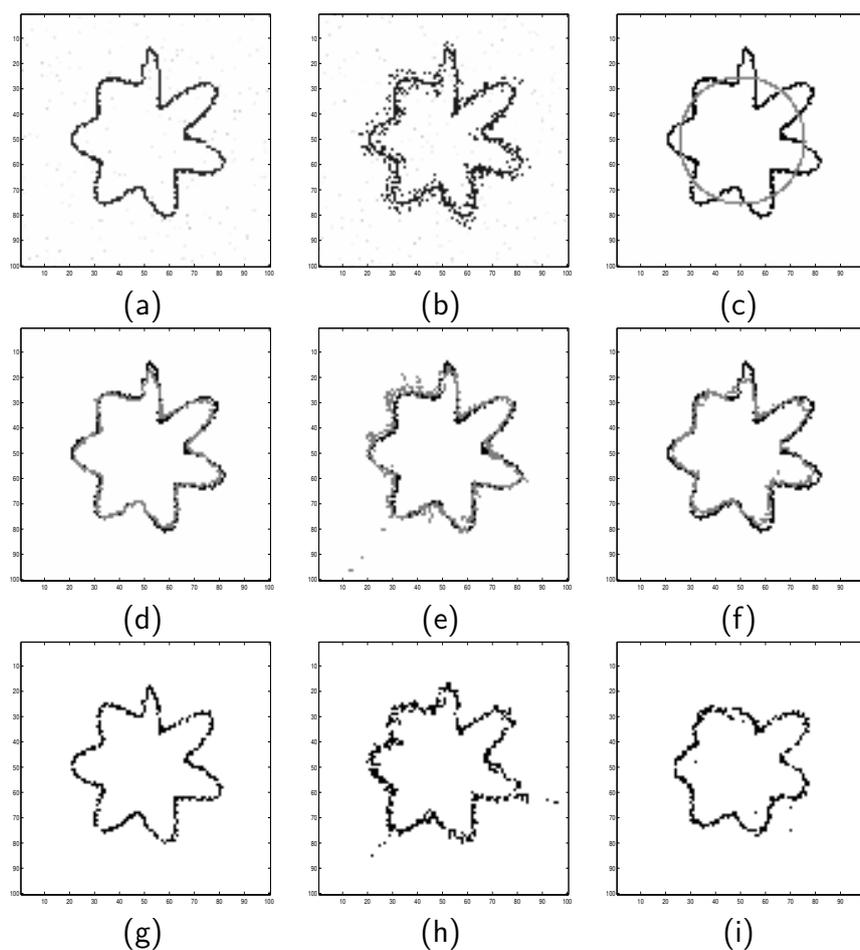


Figure 4.6 – Détection de contour très distordu : (a) image à traiter : faible perturbation de contour et paramètres de bruit $(0, 10^{-2})$; (b) image à traiter, grande perturbation de contour et paramètres de bruit $(0, 10^{-2})$; (c) initialisation dans les deux cas; (d-f) résultats obtenus sur 'a' : méthode proposée ($ME_x = 1.58$), Gradient ($ME_x = 1.78$), GVF ($ME_x = 1.90$); (g-i) résultats obtenus sur 'b' : méthode proposée ($ME_x = 1.86$), Gradient ($ME_x = 2.25$), GVF ($ME_x = 2.42$).

Ce type de contour, bien qu'étant rigoureusement étoilé, nous fait penser aux bords d'une main. Dans la suite de ce manuscrit, en section 5.3, nous verrons comment cette intuition nous a conduit à nous inspirer des méthodes de génération de signal et d'estimation vue dans ce chapitre pour créer un nouveau descripteur de formes. Auparavant, dans la section suivante, je décris une application industrielle de détection de forme sans *a priori*.

4.3 Détection de contours pour une application industrielle

Dans cette section, je décris une partie des résultats que j'ai obtenus en Post-Doctorat à l'Institut Fraunhofer IIS, entre mars 2008 et août 2009. Mon projet dans le cadre d'un financement DGA puis d'un financement propre à l'Institut Fraunhofer IIS était d'estimer la position de contours dans une image acquise dans un contexte industriel, pour, *via* une comparaison entre une image 'test' et une image 'à traiter', retrouver des défauts sur une surface métallique.

La nouveauté par rapport à mes travaux de thèse est le fait d'avoir eu accès aux instruments d'acquisition, et de faire face à des images aux contours multiples et sans *a priori* de formes. Il a fallu que j'adapte des outils robustes de morphologie mathématique. J'ai pu cependant m'inspirer de notions étudiées pendant ma thèse comme l'extinction de sources en traitement d'antenne, pour créer une méthode adaptée qui estime la position de défauts dans la photographie d'une pièce métallique soumise au test.

4.3.1 Position du problème

L'objet de cette section est le développement d'un algorithme robuste au bruit pour l'estimation de la position des bords de plusieurs types de régions dans une photographie de pièces métalliques usinées. Notre objectif final est de détecter des défauts dans une image test. Ces défauts sont des défauts de structure, et nous avons choisi une illumination directe (plutôt que diffuse) [34], pour accentuer le contraste entre les défauts et le fond. Le système d'acquisition est présenté en Fig. 4.7(a). Une pièce métallique avec défauts est présentée en Fig. 4.7(b). L'objectif final est de détecter les défauts les plus visibles, mais aussi ceux présentant un faible contraste avec leur environnement (Cf les flèches en Fig. 4.7(b)). Le système d'acquisition a été pensé pour que la résolution soit de 1 pixel pour 0.1 mm. La taille minimum à considérer pour les défauts est de 0.3 mm. L'objectif de la méthode est de détecter à la fois les contours flous à faible contraste et les contours à fort contraste, avec une précision de 1.5 pixel.

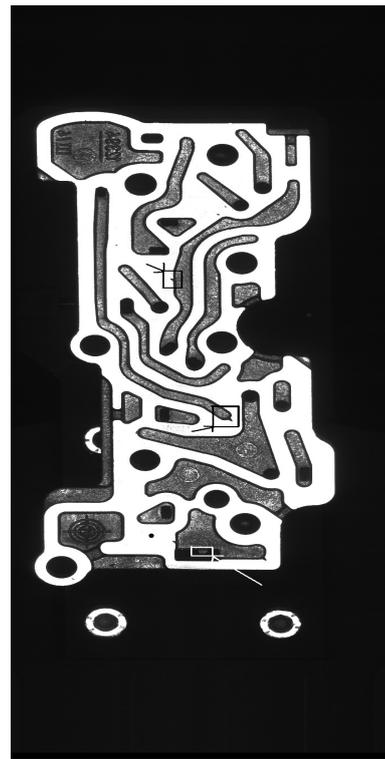
4.3.2 Algorithme proposé

Pour retrouver efficacement tous les contours et éviter les parasites dans le résultat d'estimation final qui pourraient être dus aux variations de texture et d'illumination, j'ai associé la méthode de débruitage "ForWaRD" [135], et un ensemble de méthodes de détection de contours. Nous nous sommes faits les remarques suivantes :

- le réhaussement de contour par la méthode Canny peut être utilisé pour retrouver les contours à fort contraste. Cependant la présence de zones



(a)



(b)

Figure 4.7 – Application considérée à l’Institut Fraunhofer IIS : (a) Système industriel d’acquisition d’image ; (b) Pièce métallique industrielle avec des défauts

bruitées empêche l'utilisateur de bien sélectionner les paramètres qui permettraient de retrouver les petits défauts ;

- les contours à faible contraste délimitent des régions très bruitées. Nous recherchons une méthode qui soit robuste au bruit, et donne des contours continus. C'est pourquoi nous avons adapté une méthode de type levelset [130]. Cependant, la convergence du levelset ne devait pas être influencée par la présence de contours à fort contraste.

Une solution appropriée a consisté à estimer successivement et indépendamment les contours à faible contraste et les contours à fort contraste. Pour cela, il fallait cacher les portions non pertinentes de l'image. En quelque sorte, nous avons adapté le principe de l'extinction de sources utilisé en traitement d'antenne : on estime dans ce cadre-là les paramètres des termes de forte amplitude, puis on les retranche du signal étudié, afin de faciliter l'estimation des paramètres des signaux de plus faible amplitude. On répète le procédé jusqu'à ce que l'on puisse considérer qu'il n'y ait plus de termes utiles dans le signal étudié.

C'est une méthode que l'on aurait pu utiliser pour étudier les sinusoides amorties rencontrées en section 4.2 si leurs amplitudes avaient été très différentes les unes des autres.

Soit J l'image d'entrée. Nous supposons que c'est une image bruitée modélisée par : $J = I + N$, où N représente le bruit.

L'algorithme ForWaRD conduit à une version débruitée \hat{I} de l'image où les contours sont préservés. La Fig. 4.8 résume la méthode proposée.

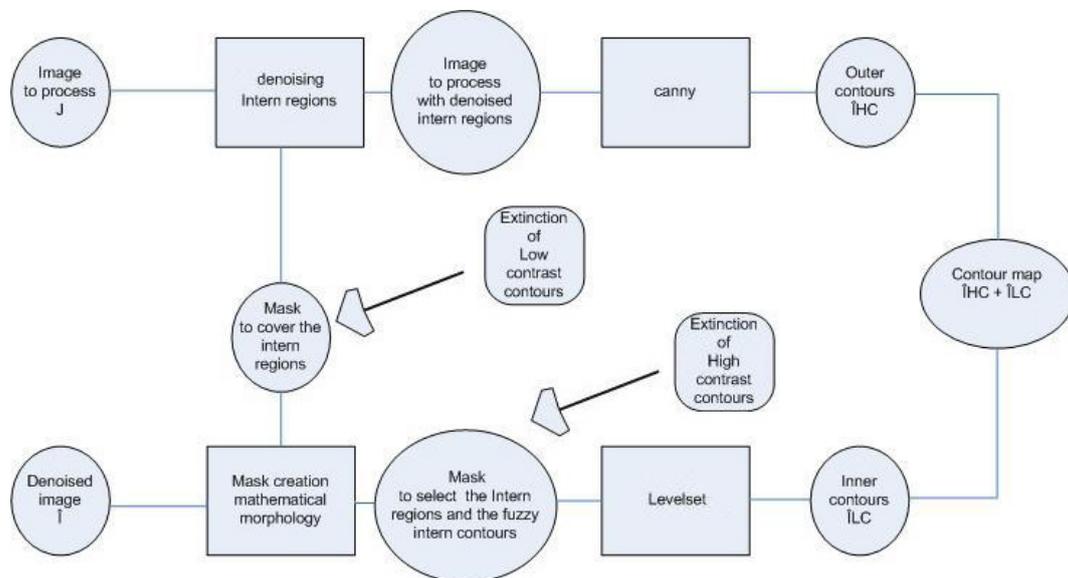


Figure 4.8 – Combinaison d'algorithmes de morphologie mathématique et d'un levelset : estimation successive de contours à fort et faible contraste

Comme présenté en Fig. 4.8, un masque est créé par des opérateurs de morphologie mathématique à partir de l'image débruitée par ForWaRD. Ce masque est

utilisé en amont des opérations suivantes :

- détection de contours par Canny, pour sélectionner et débruiter fortement les régions internes bruitées ;
- détection de contour par levelset, pour sélectionner et supprimer les contours à fort contraste et permettre la convergence vers les contours à faible contraste.

A ce point, la carte des contours \hat{I}_{HC} contenant seulement des contours à fort contraste est à disposition. La carte des contours à faible contraste, \hat{I}_{LC} , est obtenue *via* une méthode levelset, qui est détaillée en [117].

Le résultat final est constitué de la somme $\hat{I}_{HC} + \hat{I}_{LC}$ qui contient les estimées des contours à fort, et à faible contraste.

4.3.3 Résultats

Les résultats obtenus l'ont été sur des images acquises à l'Institut Fraunhofer IIS. Les résultats comparatifs ont été fournis par Christian Münzenmaier, qui a employé une méthode de type texture [56], et Stéphane Derrode, qui a employé sa méthode de segmentation par champs de Markov [33]. L'objectif ici était de montrer que toute méthode quelle que soit la famille à laquelle elle appartient aurait nécessité un travail d'adaptation à l'application considérée.

La méthode proposée est appliquée à la pièce de référence (Cf Fig. 4.9(a) et (b)). La Fig. 4.9(b) montre qu'il n'existe pas de biais significatif entre contour à estimer et contour estimé. Les Fig. 4.9(c) et (d) présentent les résultats obtenus sur une pièce avec défaut. Enfin les méthodes [56] et [33] sont appliquées sur une pièce de référence sans défaut (Cf Figs. 4.9(e) et (f)).

Des résultats complémentaires sous forme d'images sur lesquelles on pourra zoomer sont disponibles sur un site Web [105]. Une fois les contours retrouvés, on applique une rotation à l'image test en fonction de la position de deux cercles de référence dans l'image. La transformée de Hough généralisée [14] est utilisée pour trouver le centre des cercles. La Fig. 4.10 présente des résultats de détection de défaut.

On remarque que dans ces conditions aucun pixel excédentaire n'apparaît sur la carte des défauts en Fig. 4.10.

4.3.4 Bilan

A l'Institut Fraunhofer IIS, on m'a soumis un problème de contrôle non destructif que j'ai choisi de résoudre avec une combinaison adéquate de méthodes de débruitage, de morphologie mathématique et de détection de contour. Les résultats obtenus ayant donné satisfaction, mon contrat financé par la DGA a été prolongé pour six mois sur des crédits à 100 % Fraunhofer IIS pour travailler notamment sur ces thématiques mais aussi sur de l'imagerie multispectrale. Cette application de détection de contours m'a conduit à m'interroger sur la modélisation des contours flous, sujet que j'ai abordé en tout début de carrière de Maître de Conférences, en encadrant Haiping Jiang. C'était l'objet de la section 4.1.

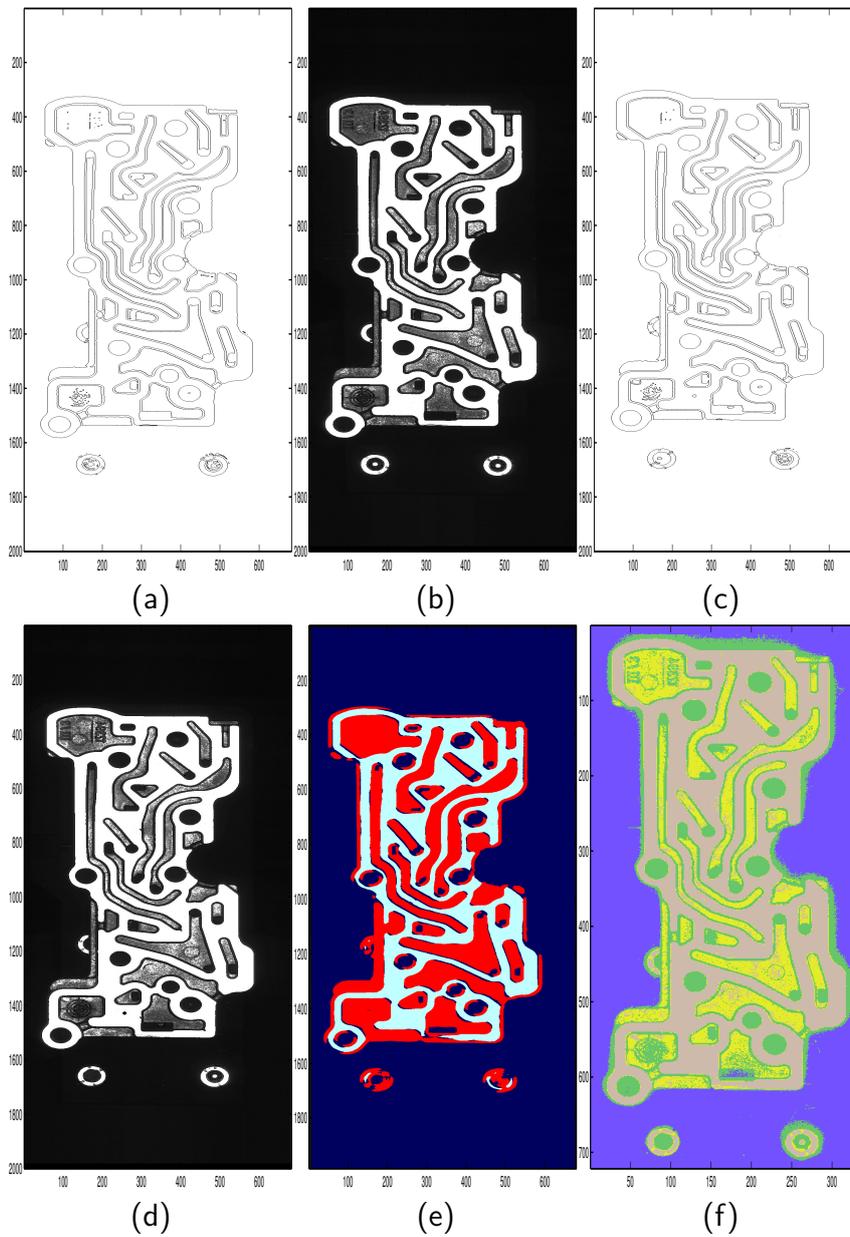


Figure 4.9 – Application considérée à l'Institut Fraunhofer IIS : (a) pièce de référence - résultat de segmentation, (b) pièce de référence - superposition ; (c) pièce avec défaut - résultat de segmentation, (d) pièce avec défaut - superposition, (e) Méthode de texture, (f) méthode Markov

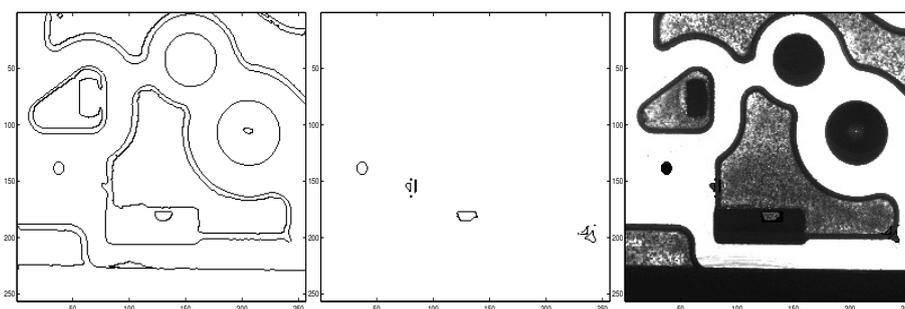


Figure 4.10 – Carte des contours sur la pièce avec défauts, défauts détectés, superposition

4.4 Conclusion

Dans cette section j'ai résumé les activités que j'ai menées en Post-Doctorat à l'Institut Fraunhofer en Allemagne, puis en début de carrière de Maître de Conférences à l'Institut Fresnel. A l'Institut Fraunhofer IIS, j'ai considéré des applications de contrôle non destructif pour lesquelles il fallait estimer avec une précision de 1.5 pixel la position de défauts sur des surfaces métalliques. Par ailleurs j'ai également travaillé sur une thématique liée à l'imagerie multispectrale, que je n'ai pas détaillée dans de manuscrit. Elle était liée à une application confidentielle en biologie. On verra dans la suite de ce manuscrit que l'imagerie multispectrale est restée une thématique d'intérêt pour l'Institut Fraunhofer, puisque la thèse d'Abir Zidi a été financée sur cette thématique (Cf Chapitre 7). L'estimation de la position de contours à faible contraste dans l'application considérée à l'Institut Fraunhofer m'a conduit à m'interroger sur la possibilité de caractériser des contours 'flous' avec des méthodes d'estimation paramétrique similaires à celles que j'ai abordées en thèse. Cela a constitué mon premier sujet d'étude en début de carrière de MCF, lors de l'encadrement de Haiping Jiang [67]. Ensuite, nous avons étudié ensemble le problème de la caractérisation de contours étoilés très distordus. En effet la méthode DIRECT combinée à l'interpolation par splines que j'avais mise au point en thèse donnait de bons résultats dans le cas de distortions de faible amplitude, mais je souhaitais créer une méthode dont le temps de calcul ne dépende pas de l'amplitude des distortions. C'est ainsi que nous avons adapté une méthode de caractérisation de sinusoides amorties [64]. Les travaux de Haiping concernant la caractérisation de contours étoilés a servi de base aux travaux de Nabil Boughnim, dans le cadre de la création d'une nouvelle signature pour caractériser des postures de la main. C'est une partie de l'objet du Chapitre 5.

5 Interface homme machine et systèmes de vision

5.1 Introduction

La suite directe des travaux de Haiping Jiang a consisté à créer une nouvelle signature, pour proposer une solution très en amont à un enjeu concernant une interface homme machine produite par la société IntuiSense. Ces premiers travaux, de niveau bas sur l'échelle TRL, ont été réalisés lors de la thèse de Nabil Boughnim. Ils sont restés relativement théoriques. Les méthodes ont été codées en Matlab. Ces travaux se sont poursuivis par une mise en place effective de code C++ sur des distributeurs chez IntuiSense. Il s'est alors agi des travaux de Benoit Martin. En section 5.2, je présente une étude bibliographique à propos des méthodes de détection et de classification en traitement d'image. En section 5.3 je résume les contributions de la thèse de Nabil Boughnim : la création d'une nouvelle signature, et son application à la caractérisation des postures de la main. En section 5.4 je présente l'outil de mesure d'audience mis en place par Benoit Martin pour la société IntuiSense. Il s'agissait notamment d'estimer la position de personnes dans une scène complexe, afin de localiser l'utilisateur le plus probable d'un distributeur automatique. Enfin en section 5.5 je présente un travail d'application réalisé pour l'entreprise Detect Réseaux. L'objectif était d'estimer la position d'une canalisation imagée par un géoradar, grâce à un programme implanté sur une interface homme-machine. Ces travaux ont fait l'objet de la publication en revue suivante : [21] ; et des publications en conférences suivantes : [19], [20], [122], [123].

5.2 Etude Bibliographique

5.2.1 La détection faciale en traitement d'images

En traitement d'images, la détection d'objet consiste à pouvoir automatiquement déterminer si un objet cible est présent ou non dans une image donnée et, si oui, de pouvoir donner sa position.

La méthode la plus célèbre, et qui est considérée comme la pierre angulaire dans le domaine de la détection d'objet en traitement d'image, est la méthode de Viola-Jones [168]. Proposée en 2001 par Paul Viola et Michael Jones dans [159], cette méthode est appliquée à la détection faciale et utilise des caractéristiques pseudo-Haar, Adaboost et une représentation appelée l'image intégrale. Cette

méthode présente l'avantage de pouvoir fonctionner en temps réel et d'avoir une complexité algorithmique faible [73].

Avec la méthode de Viola-Jones, l'objet à détecter est décomposé en caractéristiques pseudo-Haar. La Figure 5.1 montre les deux premières caractéristiques pseudo-Haar décrivant un visage humain.

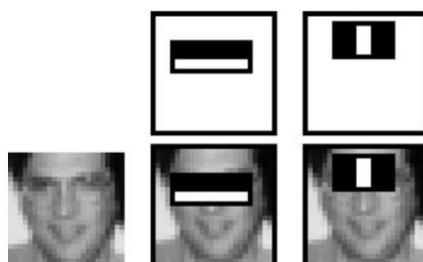


Figure 5.1 – Les deux premières caractéristiques pseudo-Haar pour la détection de visages humains

Le détecteur de Viola-Jones en tant que tel est un classifieur en cascade créé avec AdaBoost et amélioré par l'utilisation de l'image intégrale [160]. Chacune des étapes de ce classifieur en cascade sont des sous-classifieurs, composés d'un ensemble de caractéristiques pseudo-Haar, et de leur seuil d'acceptation correspondant. Un schéma du fonctionnement d'un classifieur en cascade est disponible en Fig. 5.2.

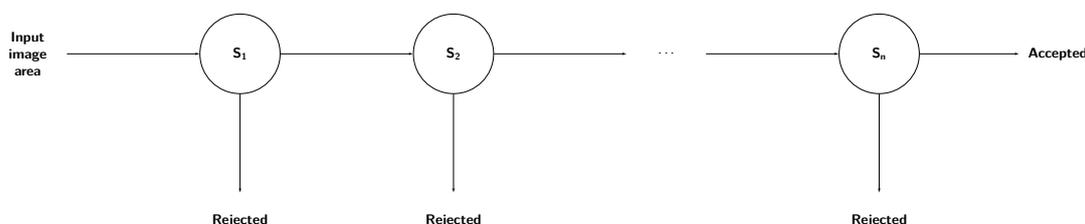


Figure 5.2 – Fonctionnement d'un classifieur en cascade

Seules les zones de l'image étudiée ayant passé toutes les étapes du classifieur seront considérées comme contenant l'objet recherché. Des exemples de résultats sont disponibles en Fig. 5.3.

5.2.2 Le suivi d'objet en traitement d'images

Le suivi d'objet en traitement d'images est le processus d'estimation de l'état, par exemple la position ou l'échelle, au cours du temps, d'un objet en mouvement

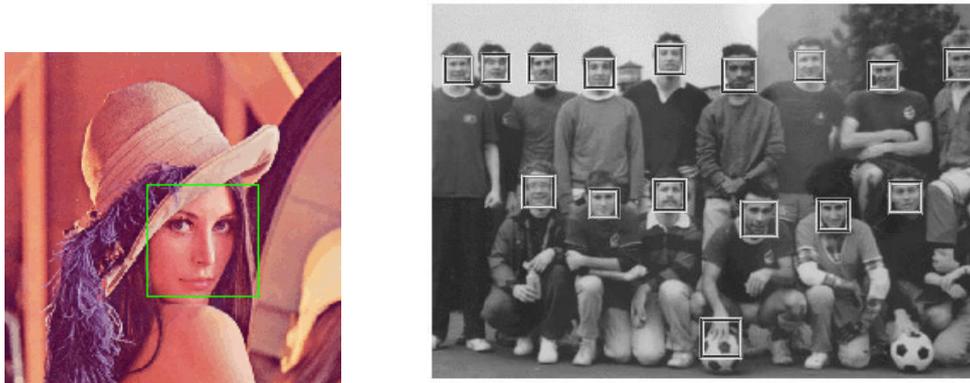


Figure 5.3 – Exemples de résultats obtenus avec la méthode de Viola-Jones

dans une vidéo ou dans une séquence d'images [169]. Il s'agit d'une problématique primordiale en vision par ordinateur qui possède une large gamme d'applications, telles que la vidéo-surveillance, la navigation de robots ou la conduite de véhicules autonomes [164].

Dans un problème de suivi d'objet, connaître les composantes physiques de l'objet cible, *i.e.* sa couleur ou sa forme, peut être utile. Dans [79], les informations colorimétriques de l'objet cible sont utilisées, tandis que dans [81], des informations de forme sont utilisées. Cependant, ce type d'information n'est pas toujours nécessaire et la méthode de suivi peut se contenter de connaître la position initiale de l'objet à suivre. Par exemple, la méthode de l'Optical Flow de Lucas-Kanade, proposée dans [13] et détaillée à la suite de ce paragraphe, nécessite simplement la position de point-clefs décrivant l'objet et suivra ces points d'une image à l'autre.

L'Optical Flow (ou Flux Optique) est la représentation du mouvement, tel qu'il apparaît pour une caméra, d'objets de surfaces et de bords dans une scène causé par le mouvement relatif entre un observateur (un œil ou une caméra) et la scène. L'idée de l'Optical Flow fut proposée par le psychologue James J. Gibson en 1950 pour décrire le stimuli visuel que subissent les animaux se mouvant dans le monde [50]. L'Optical Flow est souvent utilisé pour définir les mouvements entre deux trames (ou une séquence de trames) d'une vidéo, sans connaissance *a priori* sur la contenance de ces trames. Typiquement, le mouvement en lui-même indiquera si quelque chose d'intéressant se produit. Le mouvement, caractérisé par Optical Flow, est utilisé en robotique pour du traitement d'images et du contrôle de navigation [15, 8].

Un exemple de résultat obtenu grâce à l'Optical Flow est disponible en Fig. 5.4.

L'idée de base de l'algorithme de Lucas-Kanade (LK) se fonde sur trois hypothèses (voir Fig. 5.5) :

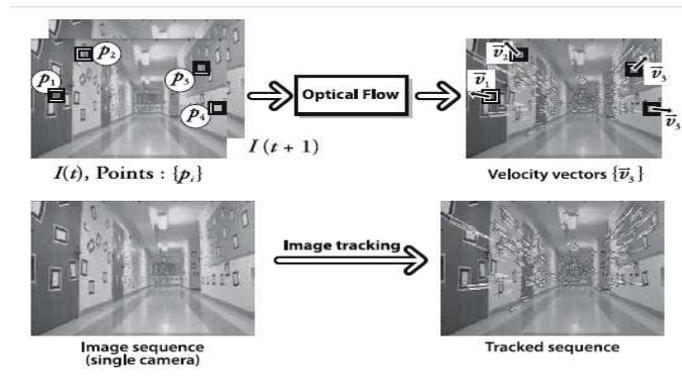


Figure 5.4 – Optical Flow

- *Luminosité constante* : Un pixel de l'image d'un objet dans la scène ne change pas (ou peu) d'apparence lors de ses potentiels mouvements d'une trame à l'autre. Dans le cas des images en nuances de gris, cela signifie que l'on considère que le niveau de gris d'un pixel donné ne change pas alors qu'il est suivi d'une trame à l'autre.
- *Persistance temporelle ou "petits mouvements"* : Le mouvement d'un objet (d'une surface) évolue lentement au cours du temps. En pratique, cela signifie que l'incrémentation temporelle est suffisamment élevée, comparée à l'échelle du mouvement dans une séquence vidéo, afin d'empêcher l'objet de bouger d'une trop grande distance d'une trame à l'autre.
- *Cohérence spatiale* : Les points voisins dans une scène appartiennent à la même surface, possèdent le même mouvement et se projettent vers les points proches dans le plan de l'image.

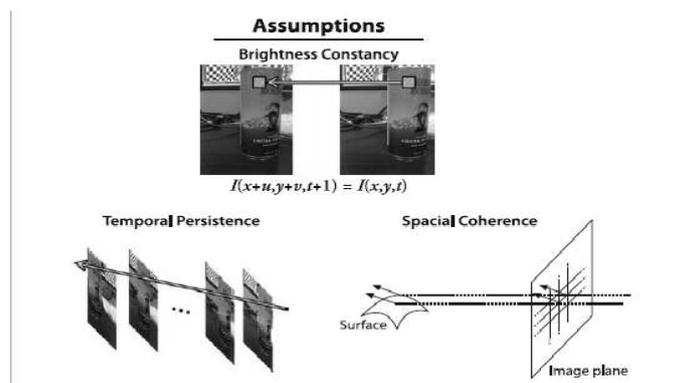


Figure 5.5 – Hypothèses à propos de l'Optical Flow de Lucas-Kanade

Un potentiel problème pouvant apparaître lors de l'utilisation de LK est que, de par l'utilisation de petites fenêtres de recherche, les grands mouvements peuvent faire bouger les point-clefs suivis hors de cette petite fenêtre de recherche. Il devient donc impossible pour l'algorithme de trouver ces point-clefs. De plus, des

mouvements importants ou incohérents sont souvent observés en pratique. Ce problème a donc conduit au développement d'un algorithme de Lucas-Kanade dit "pyramidal", qui suit un objet cible en commençant par le plus haut niveau d'une image pyramidale (précision des détails faible) et de descendre les étages au fur et à mesure (pour affiner la précision des détails). Ainsi, les hypothèses de mouvements sont respectées et il est possible de suivre des mouvements plus larges et plus rapides. Cette méthode de l'Optical flow de Lucas-Kanade "pyramidal" est illustrée en Figure 5.6.

Dans [70], le calcul d'une erreur "aller-retour" est introduit dans l'Optical Flow classique afin d'en améliorer la précision. Ce type d'Optical Flow est appelé le Median Flow.

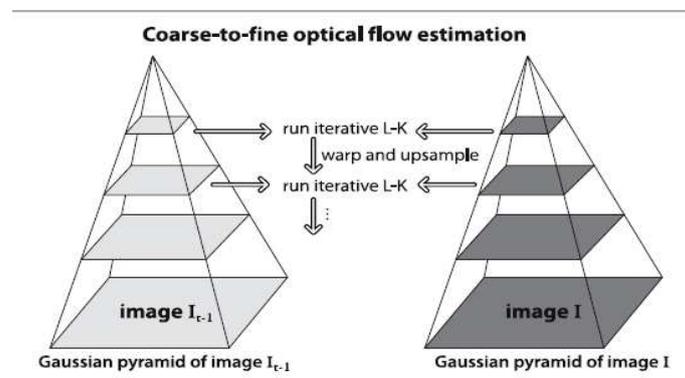


Figure 5.6 – Optical Flow de Lucas-Kanade "pyramidal"

5.2.3 La reconnaissance d'objet en traitement d'images

En traitement d'images et vision par ordinateur, la reconnaissance d'objet est le fait de pouvoir automatiquement mettre une étiquette sur un objet, e.g. définir si un visage donné est un visage d'homme ou de femme. Pour pouvoir atteindre un tel objectif, il est nécessaire de passer par de la classification d'images. La classification d'images est habituellement faite à l'aide d'algorithmes de machine learning tels que les Réseaux de Neurones Conventionnels (CNN) [86] ou les Support Vector Machine (SVM) [87]. La reconnaissance d'objets peut aussi s'effectuer de manière plus simple en utilisant des distances (e.g. euclidienne ou de mahalanobis) [22] ou en utilisant un classifieur des "plus proches voisins" [7].

Pour pouvoir faire de la classification d'images, des images d'entraînement sont nécessaires, *i.e.* un ensemble d'images représentant l'objet que l'algorithme de classification utilisera afin "d'apprendre" l'objet. Le nombre d'images d'entraînement utilisé est un important facteur pour la reconnaissance d'objets. En effet un nombre suffisant d'images permettra au système de reconnaissance d'avoir un bon taux de précision tandis qu'un nombre trop faible d'images réduirait ce taux de précision [48]. De nombreuses bases de données d'images ont été créées dans le domaine de la reconnaissance et caractérisation faciale, telles que la FERET database [144], la YALE Face database [49], la ORL Database of Faces [147], la Labeled Face in the Wild database [60] et encore beaucoup d'autres.

De plus, un système de reconnaissance d'objet ne travaille pas directement sur une image brute : il est nécessaire d'en extraire la représentation de l'objet, *i.e.* des informations utiles issues des images, que ce soient des images d'entraînement ou des images d'entrée [148]. Une approche classique serait d'appliquer une méthode statistique telle que l'Analyse en Composante Principale (ACP) [157] ou une Analyse Linéaire Discriminante (ALD) [43] aux images. Une autre approche est d'utiliser des descripteurs pour décrire, soit la texture, soit la forme de l'objet étudié. Parmi les descripteurs les plus utilisés dans le domaine de la reconnaissance et de la caractérisation faciale on trouve : les Local Binary Patterns (LBP) [7], les Histogram of Oriented Gradients (HOG) [91] et les descripteurs SIFT [44]. Dans le domaine de la reconnaissance de genre, afin d'améliorer le taux de bonne reconnaissance, ces descripteurs ont été combinés avec des Histogrammes de Couleur (CH) ou des caractéristiques de Gabor [148].

En ce qui concerne les méthodes de classification, dans ce résumé, seule la méthode du SVM sera expliquée en détail.

Une Machine à Vecteur de Support (ou Support Vector Machine ou SVM) est un concept en informatique et statistique lié à un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé destiné à analyser des données et reconnaître des objets. Lors d'une utilisation en classification, le SVM cherche un hyperplan optimal en tant que fonction de décision dans un espace à grandes dimensions [158, 140].

Pour un problème de reconnaissance d'objet bi-classe, si on suppose les classes linéairement séparables, le SVM choisit une frontière de décision linéaire qui minimise l'erreur générale. La frontière de décision choisie est représentée par un hyperplan dans l'espace et possède la plus grande marge possible entre les deux classes. Ici, la marge est définie comme la somme des distances entre les éléments de chaque classe les plus proches de l'hyperplan.

Dans le cas le plus simple, c'est-à-dire une classification bi-classes avec des classes linéairement séparables, les données d'entraînement comprennent l cas : $\{\mathbf{x}_i, y_i\}, i = 1, \dots, l$, où $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ est un espace à N dimension et $y \in \{-1, +1\}$ est le label des classes. Les objets d'entraînement sont linéairement séparables s'il existe un vecteur \mathbf{w} et un scalaire b tels que :

$$y_i(\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i) - b \geq 0$$

où \mathbf{w} représente l'orientation d'un plan discriminant et b détermine l'offset de ce plan discriminant par rapport à l'origine. L'espace hypothétique peut être défini par l'ensemble de fonctions donné par :

$$f_{\mathbf{w}^T, b} = \text{sign}((\mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x}_i) + b). \quad (5.1)$$

Le SVM trouve les hyperplans séparant les données pour lesquels la distance entre les classes est maximum en résolvant le problème d'optimisation contraint :

$$\min_{\mathbf{w}} \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2.$$

On maximise ainsi la marge, comme illustré en Fig. 5.7, avec la contrainte suivante : les vecteurs de support ne doivent pas être à l'intérieur de la marge.

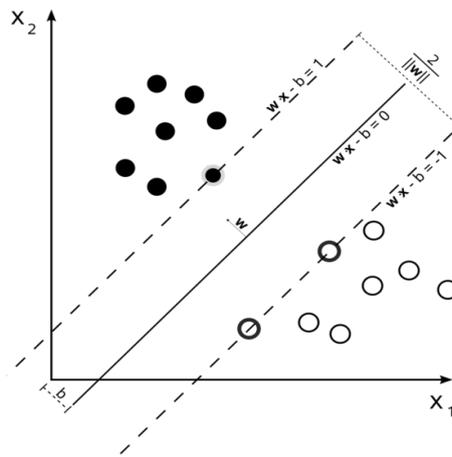


Figure 5.7 – SVM : illustration

Dans le cas des classes non séparables linéairement, le SVM recherche l'hyperplan maximisant la marge et minimisant une quantité proportionnelle au nombre

d'erreurs de mauvaises classifications en introduisant une variable de relaxation $\zeta_i \geq 0$. Le problème d'optimisation contraint pour des données non séparables devient alors :

$$\min_{\mathbf{w}, \zeta_1, \dots, \zeta_l} \left[\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^l \zeta_i \right] \quad (5.2)$$

où $0 < C < \infty$ est une constante positive permettant un compromis entre la largeur de la marge et le nombre de mauvaises classifications. En général, il faut choisir C pour toute expérience de classification, en fonction de la nature des données.

Dans le cas des surfaces de décision non-linéaires, un vecteur de caractéristique $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ est caractérisé dans un espace euclidien \mathcal{F} de dimension plus élevée via une fonction non-linéaire $\varphi : \mathbb{R}^N \mapsto \mathcal{F}$ [140]. Le problème de la marge optimale dans \mathcal{F} peut être obtenu en remplaçant \mathbf{x}_i^T avec $\varphi(\mathbf{x}_i)^T$. Pour répondre à ce problème, Vapnik [158] proposa une manière de créer un SVM non-linéaire en appliquant une fonction de kernel pour maximiser la marge des hyperplans. Une fonction de kernel \mathcal{K} est définie par :

$$\mathcal{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \varphi(\mathbf{x}_i)^T \cdot \varphi(\mathbf{x}_j) \quad (5.3)$$

et avec la fonction de kernel ci-dessus, l'Eq. (5.1) devient :

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i \in \mathbb{S}} \zeta_i y_i \mathcal{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \right) \quad (5.4)$$

où ζ_i est un multiplicateur de Lagrange non nul, \mathbb{S} est un sous-ensemble d'indices $\{1, 2, \dots, l\}$ correspondant à ζ_i et définissant les vecteurs de support (SVs).

En introduisant le kernel, les SVM gagnent en flexibilité dans le choix de la forme de l'hyperplan séparant les classes, la linéarité n'est pas nécessaire et les données ne nécessitent pas de toutes avoir la même forme fonctionnelle. Si les paramètres sont choisis de manière appropriée, comme par exemple le paramètre C , les SVM peuvent être suffisamment robustes même quand les données d'entraînement sont biaisés, *i.e.* ils sont plus robustes au bruit. D'autres types de kernels sont aussi utilisés pour les SVM, comme par exemple le kernel gaussien (RBF) et le kernel polynomial, dont les expressions sont en Eq. (5.5) et Eq. (5.6) respectivement.

$$\mathcal{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp \left(-\frac{\|\varphi(\mathbf{x}_i) - \varphi(\mathbf{x}_j)\|^2}{2\gamma^2} \right) \quad (5.5)$$

$$\mathcal{K}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \left(\varphi(\mathbf{x}_i)^T \cdot \varphi(\mathbf{x}_j) + 1 \right)^d \quad (5.6)$$

5.3 Caractérisation de contours non étoilés et application à la reconnaissance de postures de la main

5.3.1 Caractérisation des postures de la main par une nouvelle signature : introduction

La caractérisation de postures de la main apparaît comme un enjeu important dans un procédé de classification. Des résultats ont été obtenus par l'équipe GSM à la fin des années 2000 [39], mais restaient limités par le temps de calcul nécessaire pour obtenir des descripteurs (de Fourier ou de Hu). Nous avons donc voulu créer un nouveau descripteur, fondé en partie sur les principes de génération de signaux présentés dans les chapitres précédents (3 et 4) de ce manuscrit. L'objectif final est d'estimer au mieux un indice de posture lorsqu'un utilisateur fait un geste de la main devant une interface homme machine. Une fois la signature générée à partir de l'image à traiter, une méthode de classification est bien sûr utilisée pour estimer au mieux l'indice de la posture. Mais cet aspect du travail réalisé avec Nabil Boughnim ne sera pas détaillé ici. On se référera à [21] pour plus de détails.

5.3.2 Génération de la signature

La nouvelle signature dédiée aux postures de la main doit comme toute signature assurer un pouvoir discriminant maximal entre des postures très semblables. Elle doit aussi être munie de propriétés d'invariance à la rotation, à la translation, et au facteur d'échelle. Enfin on doit pouvoir reconstruire l'image de départ en 'inversant' la signature.

La Fig. 5.8 présente le dictionnaire de postures qui nous a été fourni comme cahier de charges par l'entreprise IntuiSense.

En observant ces postures, on réalise, et c'est l'idée de départ de ce travail, que les contours de la main ressemblent aux contours étoilés distordus considérés pendant la thèse de Haiping Jiang (Cf Chapitre 4). Un bref état-de-l'art permet de comprendre en quoi une signature fondée sur un principe de génération de signal à partir d'une image pourrait être avantageuse. Un objet bi-dimensionnel peut être caractérisé par des invariants bi-dimensionnels obtenus avec des moments de Hu [59], Zernike [35, 80], ou Legendre [45]. Les descripteurs de Fourier sont aussi d'un intérêt certain [36, 143]. Ils sont obtenus en prenant la transformée de Fourier de la coordonnée radiale du contour dans un repère de coordonnées polaires. Ils sont donc adaptés aux contours étoilés, ce qui était le cadre de travail de la méthode décrite au Chapitre 4. De même, les coordonnées polaires sont considérées dans la méthode proposée dans [152].

Cependant le calcul de moments de Hu ou Zernike peut être lourd d'un point

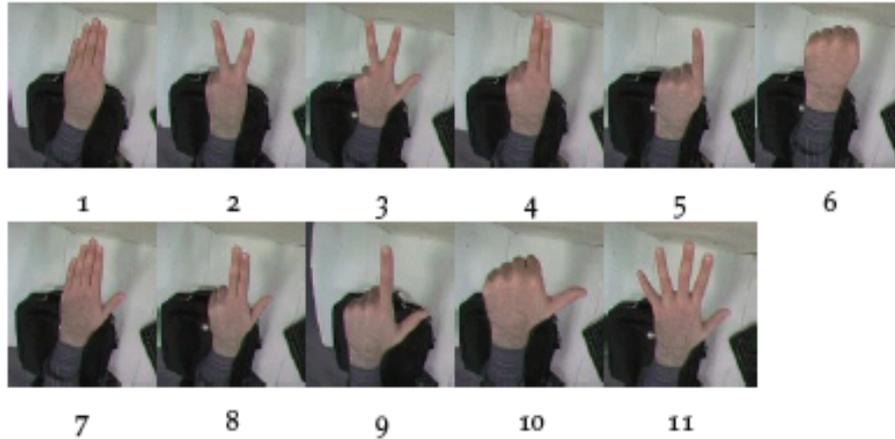


Figure 5.8 – Dictionnaire de 11 postures de la main

de vue numérique, et le contour d'une posture de la main n'est pas étoilé en général. D'autres références permettent d'aborder les contours non étoilés, mais ne fournissent pas une résolution de 1 pixel seulement [51]. Au contraire, nous souhaitons proposer une signature offrant une résolution de un pixel. La méthode proposée est inspirée de [152] mais aussi bien sûr de [64, 100]. A ceci près qu'il a fallu adapter notre signature, par rapport aux travaux réalisés dans [100] puis [64] pour faire face à des contours non-étoilés.

La méthode proposée divise l'image en plusieurs anneaux concentriques centrés sur un point de référence. Les pré-requis quant à ce point de référence sont faibles, contrairement au cas où l'on souhaiterait étudier un contour étoilé. L'image I est supposée de taille $N \times N$, et ses valeurs de pixels sont notés $I_{l,m}$ (Cf Fig. 5.9(a)). Les pixels à 1 constituent le contour à caractériser. L'image est associée à un repère de coordonnées polaires de pôle $\{l_c, m_c\}$ (Cf Fig. 5.9(a)). Ce pôle peut être par exemple le centre de gravité des pixels du contour.

Une antenne circulaire est associée à l'image : le nombre de capteurs est noté Q et un capteur correspond à une direction de génération D_i , qui fait un angle θ_i avec la verticale.

Afin de pouvoir reconstruire le contour de départ à partir de la signature, on ne génère pas une seule composante de signal sur un capteur donné d'indice i . On génère P composantes de signaux, chaque composante étant associée à un anneau représenté en Fig. 5.9(b).

Nous supposons de façon implicite que, pour une direction de génération D_i , il n'y a qu'un seul pixel dans chacun des P intervalles ou 'anneaux'. La valeur de P peut différer d'une direction D_i à une autre. Sa valeur maximale théorique est par exemple $\frac{N}{\sqrt{2}}$, si $l_c = N/2$ et $m_c = N/2$. Dans ces conditions la valeur de Q ne doit pas excéder $\sqrt{2}\pi N$: elle est suffisante pour prendre en compte tous les pixels d'un intervalle p . En résumé, nous générons P vecteurs signaux pour chaque

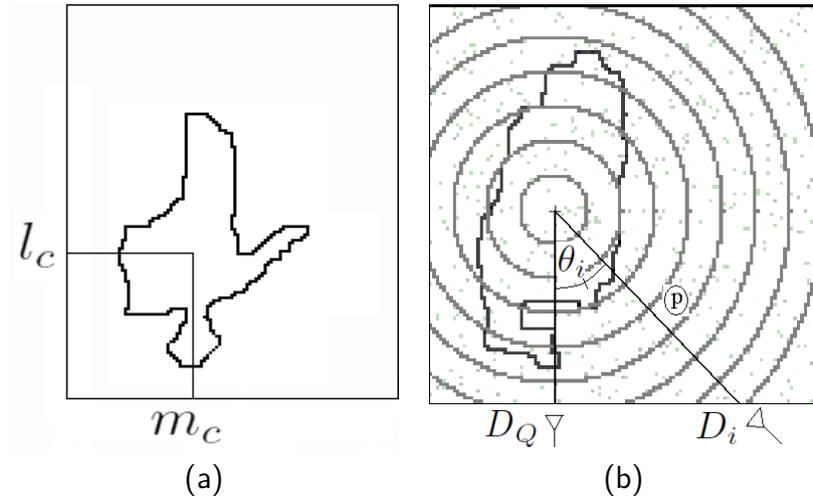


Figure 5.9 – Caractérisation de posture : (a) Image et modèle de contour ; (b) Méthode de génération de signal.

direction D_i . Pour le $p^{\text{ème}}$ intervalle ($p = 1, \dots, P$) et la direction D_i ($i = 1, \dots, Q$), la composante de signal $z_{p,i}$ de la signature est calculée comme suit :

$$z_{p,i} = l_{p,i,m_{p,i}} \sqrt{(l_{p,i} - l_c)^2 + (m_{p,i} - m_c)^2} \quad (5.7)$$

Les composantes $z_{p,i}$ ($p = 1, \dots, P$, $i = 1, \dots, Q$) sont groupées dans la matrice \mathbf{Z} de taille $P \times Q$:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdot & \cdot & z_{1,Q} \\ z_{2,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ z_{P,1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_{P,Q} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

où plusieurs valeurs de $z_{p,i}$ sont nulles :

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & z_{1,2} & \cdot & 0 & z_{1,Q} \\ z_{2,1} & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ z_{P,1} & 0 & \cdot & \cdot & z_{P,Q} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Toutes les colonnes de \mathbf{Z} doivent avoir le même nombre de lignes, donc du bourrage de zéros peut être réalisé pour certaines directions de génération. Si le nombre d'intervalles P et le nombre de directions de génération D_i est choisi de façon à ce qu'il n'y ait qu'un seul pixel de contour par couple de valeurs (p, q) , alors la signature permet de reconstruire parfaitement le contour : elle contient les coordonnées radiales du contour dans le système de coordonnées polaires de

pôle $\{l_c, m_c\}$.

Cependant notre objectif n'est pas forcément de reconstruire parfaitement le contour : il doit le caractériser de façon à ce que toutes les postures de la main puissent être différenciées. De plus, la signature doit être invariante à la rotation. Dans ce but, les composantes $z_{p,i}$ d'un intervalle donné p sont triées par ordre croissant.

Avant de calculer cette signature, l'image considérée doit être soumise à quelques pré-traitements : nous sélectionnons la plus petite sous-image contenant entièrement le contour, que l'on a appelée 'région d'intérêt'. Cela est fait en projetant le contenu de l'image sur des antennes linéaires à gauche et en bas (comme présenté en section 3.3 du chapitre 3). Les sections non-nulles des signaux générés donnent l'emplacement du contenu de cette région d'intérêt. Extraire cette région d'intérêt permet aussi de réduire le temps de calcul lié à la génération de la signature.

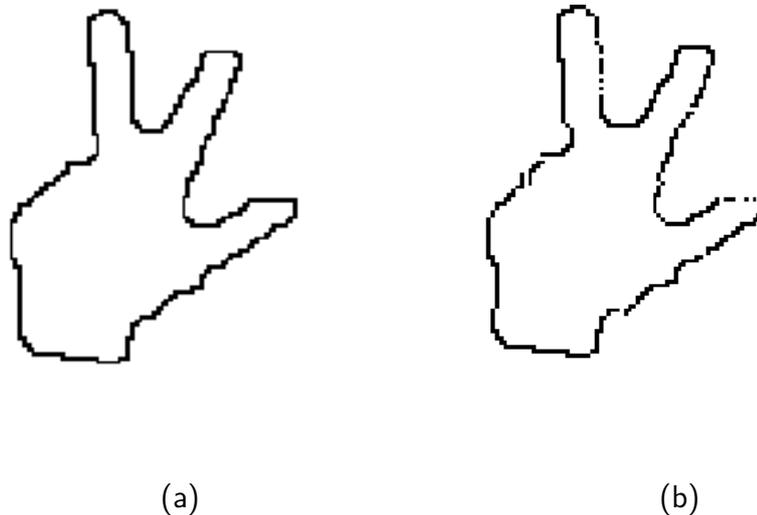


Figure 5.10 – Caractérisation de posture : (a) Contour segmenté ; (b) Contour reconstruit à partir de la signature \mathbf{Z} .

Finalement, nous disposons *via* les lignes de \mathbf{Z} d'un ensemble de descripteurs invariants :

- Elles décrivent entièrement le contour : les lignes de \mathbf{Z} forment un ensemble complet quand un couple (p, i) correspond à un pixel seulement. La Fig. 5.10 illustre ceci au travers d'un contour de la main et du contour reconstruit à partir de la signature (Cf Fig. 5.10(a) et (b) respectivement).
- Elles sont invariantes à la translation : la position de la région d'intérêt est estimée en aveugle, quelle que soit la position de la main dans l'image ini-

tiale.

- Elles sont invariantes au facteur d'échelle : quelles que soit la taille de la région d'intérêt, le nombre de composantes dans la signautre \mathbf{Z} est le même.
- Elles sont invariantes à la rotation, *via* le tri des composantes d'un intervalle donné.

5.3.3 Bilan

La signature proposée permet de faire face au cas de contours non étoilés, ce qui est le cas des postures de la main. Ses propriétés d'invariance nous permettent d'appliquer cette signature à la classification de postures de la main. Pour cela, nous avons inséré un processus de pré-sélection *via* le calcul d'un critère de sphéricité appliqué à la main. Par exemple, les postures 2, 3, 7, 8, 9 et 11 présentent un critère de sphéricité élevé, et inversement pour les postures 1, 4, 5, 6, et 10.

Dans le processus de classification, nous avons aussi inséré une réduction de dimensionnalité par analyse en composantes principales (ACP). Le classifieur utilisé était la distance de Mahalanobis. C'est une méthode simple mais qui a suffi à bien distinguer les 11 postures de notre dictionnaire les unes des autres. Dans la suite de mes travaux concernant les interfaces homme machine, je suis allé plus loin dans les aspects intégration, et j'ai utilisé des méthodes de classification plus évoluées telles les machines à vecteur de support. Il s'agit des travaux de Benoit Martin, présentés dans la suite de ce manuscrit.

5.4 Mesure d'audience par système de vision

Dans cette section est présenté l'algorithme de mesure d'audience IntuiSense Audience Metrics (ISAM) mis en place par Benoit Martin.

La Mesure d'Audience a pour but de collecter des données permettant de créer le profil d'une clientèle, comme le nombre de clients, leur genre (homme/femme), leur âge ou encore leur temps de présence dans l'environnement étudié. Un tel outil peut être utile pour des études marketing ou anthropologiques. Développé durant la thèse de Benoit Martin pour la société IntuiSense, l'outil IntuiSense Audience Metrics (ISAM) est un outil de mesure d'audience basé sur de la vision par ordinateur et conçu pour fonctionner à l'aide d'une caméra embarquée au sommet d'un distributeur automatique.

Le but de l'outil ISAM doit être de pouvoir compter et caractériser les personnes apparaissant dans le champ de vision d'une caméra, à l'aide d'algorithmes

de détection faciale et de reconnaissance faciale. Cependant, en se référant à l'état de l'art sur la détection et la reconnaissance faciale et les contraintes industrielles, les points suivants peuvent être prévus comme des verrous qui doivent être pris en compte lors du développement de l'outil ISAM :

- Le fond des images et l'illumination globale seront inconnus et non-contrôlables ;
- Les visages à détecter ne seront pas exactement face à la caméra et ne regarderont que rarement dans sa direction ;
- Le hardware bas-coût (le processeur et la caméra) implique une limite quant aux capacités de calcul ;
- Des performances temps-réel sont visées.

5.4.1 Objectifs de l'algorithme proposé

À l'heure d'aujourd'hui, l'algorithme ISAM est capable de compter les gens dans le champ de vision de la caméra et de mesurer le temps passé par chacun d'entre eux dans le champ de vision. Le fonctionnement de l'algorithme se divise en deux parties : une partie détection et une partie suivi. L'algorithme fonctionne directement sur le flux de la caméra et fonctionne sur chaque trame l'une après l'autre de manière indépendante. Les seules informations stockées entre chaque trame sont les positions des détections sur la trame précédente. Ce programme a été entièrement développé en C++ et utilise la librairie open-source de vision par ordinateur OpenCV [139].

5.4.2 Algorithme ISAM : algorithme

L'algorithme de la partie détection est disponible en Figure 5.11 tandis que la Figure 5.12 détaille la partie suivi. Dans le reste de cette sous-section, *previous detection* symbolisera les détections obtenues avant la trame courante t , et *current detection* symbolisera les détections obtenues sur la trame courante t . De plus, la position d'une détection ne doit pas être vue comme une simple coordonnée mais comme un rectangle complet encadrant le visage détecté.

• **La Partie Détection** a pour but de détecter les visages présents dans la trame courante t , à l'aide de la méthode de Viola-Jones. L'algorithme de la partie détection est disponible en Figure 5.11.

Afin de réduire la charge processeur, le détecteur de Viola-Jones ne sera appliqué sur la trame complète que une fois sur cinq. Sur les quatre trames restantes, le détecteur de Viola-Jones ne sera appliqué que sur des régions d'intérêt (ROI) choisies en fonction des positions des *previous detections*. Cette réduction de la zone de travail du détecteur de Viola-Jones a permis de réduire sa charge processeur par un facteur 2.

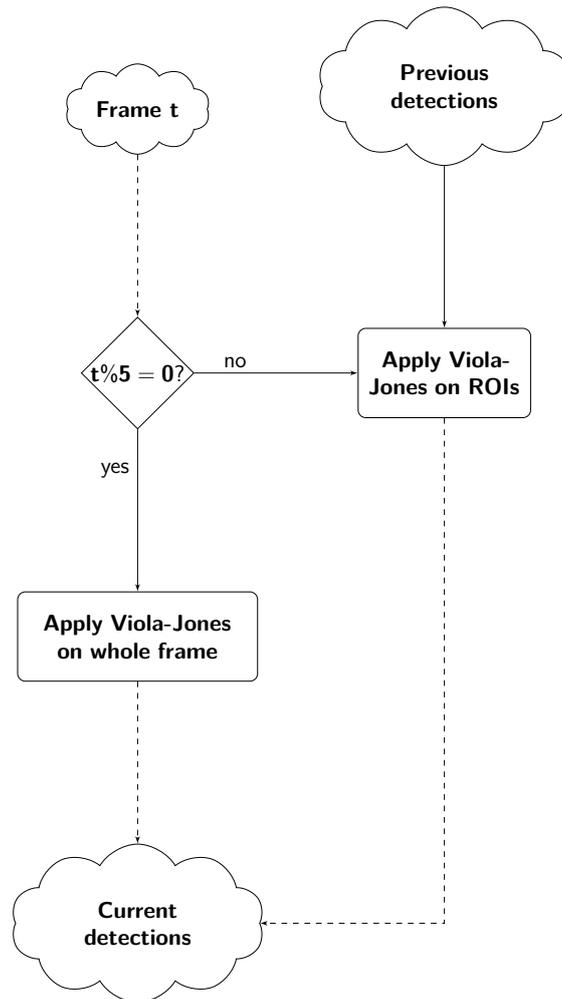


Figure 5.11 – Partie détection de ISAM

• **La Partie Suivi** est l'étape par laquelle toute trame doit passer après être passée par la partie détection. Le but primaire de l'outil ISAM étant de compter les personnes dans son champ de vision, il doit être capable de différencier ces personnes entre elles afin de pouvoir repérer quand l'une d'elles quitte son champ de vision ou si une nouvelle personne y apparaît.

Cette méthode, dont l'algorithme est disponible en Figure 5.12, est basée sur la méthode de suivi KLT, elle-même basée sur l'optical flow de Lucas-Kanade détaillé en sous-section 5.2.2.

À chaque trame, l'algorithme va commencer par comparer les positions des *current detections* à celles des *previous detections*. Pour cela, l'aire d'intersection S entre les positions de deux détections est calculée. Si cette aire S est suffisamment élevée, *i.e.* au moins 20% de la surface de la *previous detection*, alors la position de la *current detection* est considérée comme la nouvelle position de cette *previous detection*.

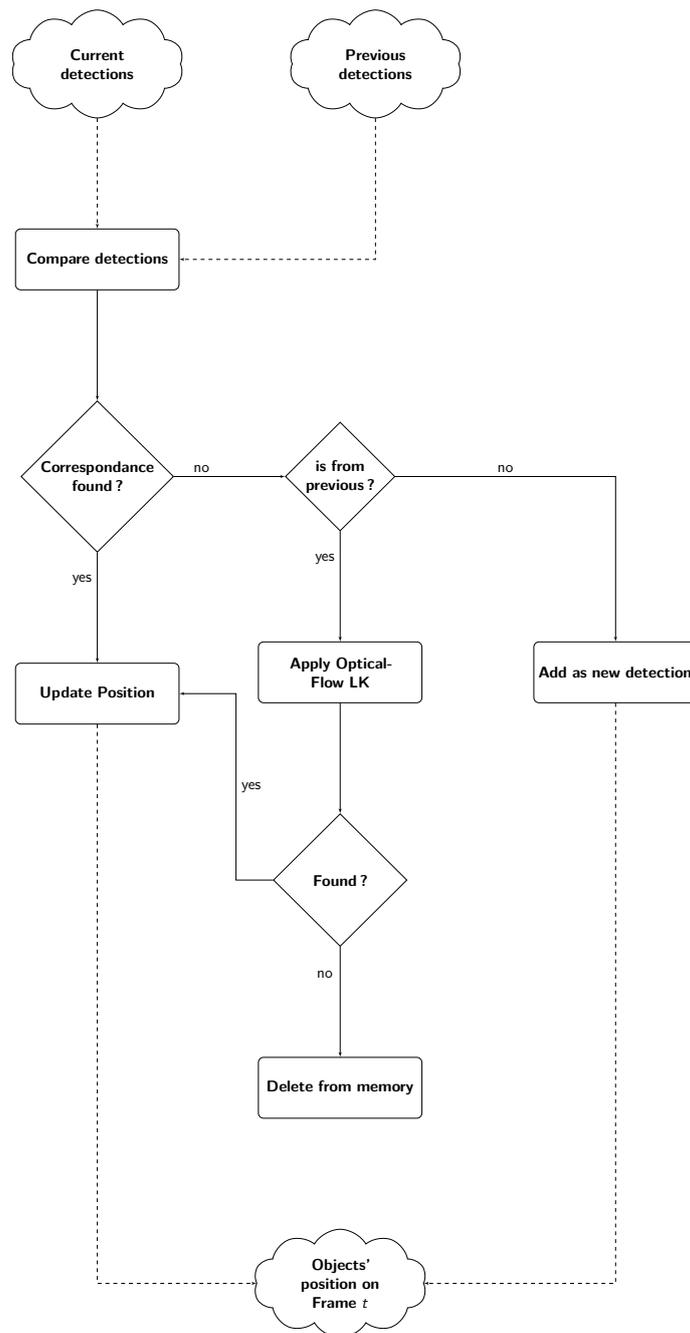


Figure 5.12 – Partie suivi de ISAM

Une fois que toutes les correspondances ont été trouvées, l’algorithme va gérer les détections qui n’ont pas de correspondance, qu’elles soient des *current detections* ou des *previous detections*.

Dans le cas d’une *current detection*, l’algorithme la considèrera comme une nouvelles personne et l’ajoutera à l’ensemble des *previous detections* pour la frame

suivante $t + 1$.

Dans le cas d'une *previous detection*, l'Optical Flow de Lucas-Kanade (LK) [13] sera utilisé afin de trouver la nouvelle position de la détection. Si les points-clefs de la détection sont retrouvés par LK, alors sa position est mise à jour. En revanche, si les points-clefs ne sont pas retrouvés par LK, alors la personne est considérée comme ayant quitté le champ de vision et est effacée des *previous detections*.

5.4.3 Algorithme ISAM : performances

• Les performances de l'outil ISAM ont été mesurées à l'aide de l'indice Multi-Object Tracking Accuracy [17], qui est calculé à l'aide l'Eq. (5.10).

$$MOTA = 1 - \frac{\sum_t (m_t + fp_t + mme_t)}{\sum_t g_t} \quad (5.10)$$

avec m_t le nombre d'objets non détectés, fp_t le nombre de faux-positifs et mme_t le nombre de mauvaises correspondances tout au long du flux vidéo.

Les performances de l'outil ISAM ont été mesurées sur des vidéos issues de la ChokePoint database [162]. Ces vidéos sont intéressantes car le comportement des personnes filmées est assez similaire au comportement de personnes devant le distributeur automatique cible :

- elles bougent de manière quasi-naturelle en direction de la caméra, qui est positionnée légèrement au-dessus de leur tête ;
- elles ne regardent pas directement en direction de la caméra, comme si elles n'étaient pas conscientes de sa présence.

Les résultats obtenus sont disponibles en Table 5.1.

Nom de la vidéo	Personnes comptées	Nombre réel de personnes	m_t	fp_t	mme_t	index MOTA
P1E_S1_C1	24	25	1	0	0	96.00%
P1E_S2_C1	20	25	5	0	0	80.00%
P1L_S3_C3	21	24	3	0	1	83.33%
P2E_S3_C11	19	24	5	0	0	79.17%
P2E_S5_C21	19	24	5	0	0	79.17%
P2L_S2_C21	23	25	2	0	0	92.00%
P2L_S4_C21	21	25	4	0	0	84.00%
P2L_S5_C21	23	25	2	0	0	92.00%

Table 5.1 – Résultats obtenus sur les vidéos de la ChokePoint database

L'algorithme ISAM obtient un MOTA moyen de 85.71% par vidéo testée et un MOTA total de 85.79%. De plus, quand l'algorithme ISAM est en fonctionnement sur le distributeur cible, qui possède un système d'exploitation Windows 7 Embedded et un processeur Celeron @2GHz et 4GB de RAM, l'algorithme ne consomme que 30% des ressources processeur et fonctionne avec une cadence

d'acquisition de 15 fps. Quelques résultats qualitatifs supplémentaires sont visibles en Figure 5.13.

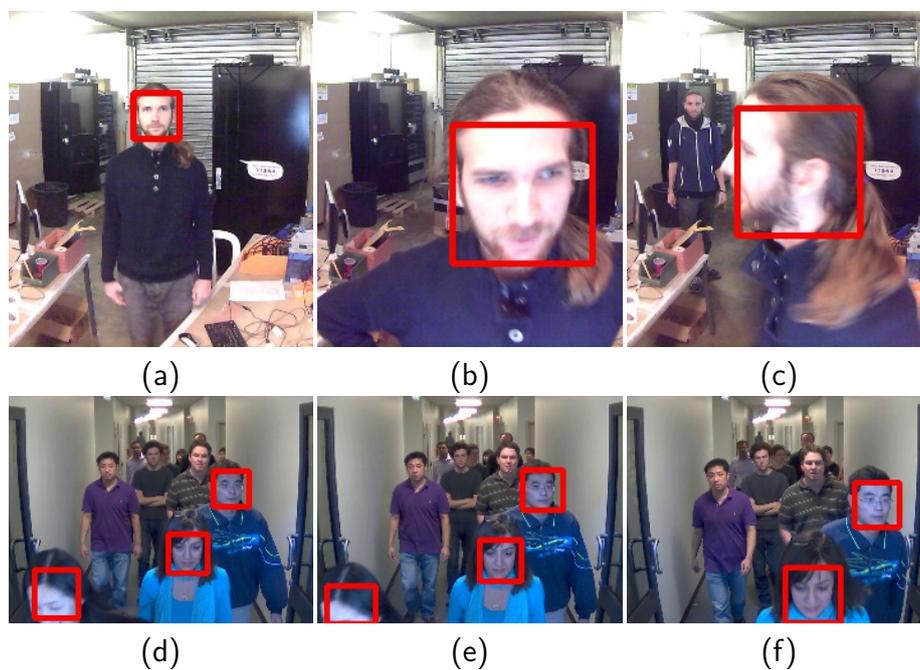


Figure 5.13 – Résultats qualitatifs de ISAM

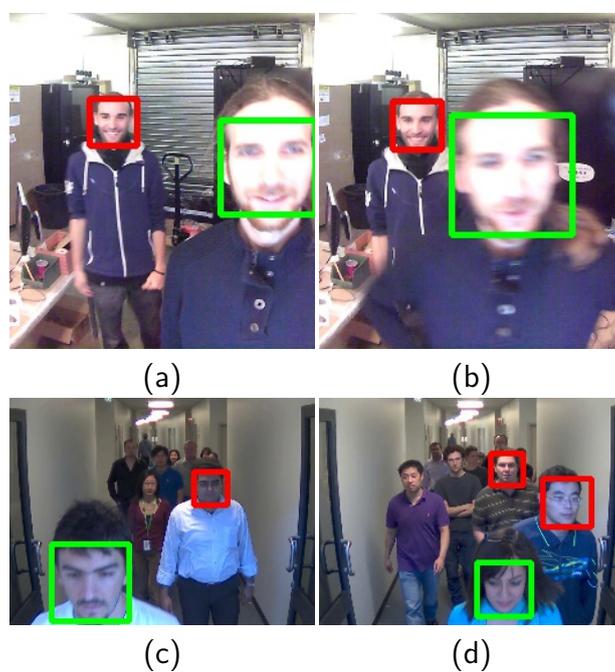


Figure 5.14 – Résultats qualitatifs de ISAM : sélection de l'utilisateur

En Fig. 5.14 est présentée une extension de ISAM à l'estimation de la position de l'utilisateur le plus probable : celui-ci est estimé comme étant le plus bas, et au milieu de la scène. Dans le cas d'un distributeur, il s'agit du consommateur.

5.5 Interface homme machine dans un contexte industriel : exploitation d'images géoradar

Dans cette section est présenté le travail réalisé avec les entreprises DetectRéseaux et Matole SAS pour créer une interface de traitement d'images géoradar.

5.5.1 Présentation du projet

L'entreprise Détect-Réseaux a contacté l'équipe GSM en 2012 dans le cadre d'un vaste projet de Recherche et Développement construit autour d'un géoradar. D'une part, un projet ambitieux et à long terme avait été mis en place avec une autre équipe de l'Institut Fresnel (HIPE) autour des capteurs. D'autre part, les signaux reçus devaient être analysés de façon automatique pour suivre au cours des acquisitions une forme d'intérêt. C'est ainsi que, j'ai consacré, en collaboration avec le chef d'équipe Salah Bourennane, un équivalent de trois mois temps plein sur 18 mois environ à une première phase de Recherche et Développement pour mettre au point un algorithme de traitement d'images. Le prototype obtenu fonctionnait avec certaines limites sur un ordinateur portable classique mais n'était pas directement exploitable sur le terrain.

C'est pourquoi une deuxième phase de travail a été confiée par Détect-Réseaux à Matole SAS, entreprise dirigée par M. Nicolas Le Petit. Lors de cette deuxième phase, une interface homme-machine a été créée, les algorithmes de traitement d'image ont été améliorés pour optimiser les temps de calcul, améliorer l'ergonomie, déterminer les paramètres de traitement optimaux en fonction des critères imposés par l'utilisation pratique du géoradar, etc. De nombreux échanges ont eu lieu entre Matole SAS et l'équipe GSM, et des déplacements lorsqu'ils étaient nécessaires, avec un investissement constaté de part et d'autre pour aboutir à une interface fonctionnelle et des programmes performants.

5.5.2 Méthodologie

Voici les points R et D considérés lors du projet Détect-Réseaux, et la collaboration avec Matole SAS :

- 1 Définition d'un critère à optimiser pour déterminer la taille optimale de la zone d'intérêt et de la zone de recherche : analyse des formes 'hyperboliques' à retrouver et de l'influence de la résolution spatiale de l'instrument d'acquisition sur la pertinence de cette taille.
- 2 Détermination de la quantification de l'image qui permet d'estimer le nombre optimal de niveaux de gris aboutissant à un compromis entre temps de calcul (nécessaire notamment à l'égalisation d'histogramme présente dans la partie ré-haussement de contraste de l'algorithme) et conservation de l'information pertinente fournie par le géo-radar.



Figure 5.15 – Le Georadar



Figure 5.16 – L'interface homme machine du géoradar

- 3 Prise en compte d'un cadrage de la zone de recherche partiellement hors de l'image radar-gramme : bourrage ou 'padding' d'image avec valeurs connues a priori dans la suite de l'algorithme.
- 4 Optimisation du débruitage de l'image par application d'un filtre de Wiener dans le domaine de Fourier avec étude concernant le choix du facteur de régularisation du filtre pour obtenir un équilibre entre efficacité du débruitage et conservation de la netteté des contours.
- 5 Détermination de l'indice de confiance adéquat qui permet la sélection de la cible dans la zone de recherche, afin d'obtenir une discrimination plus accentuée pour le réseau correspondant au modèle : ré-échantillonnage des valeurs de niveaux de gris sur un nombre optimal de niveaux fixé à 5, omission de la valeur 0 pour ne pas prendre en compte les pixels non-pertinents.
- 6 Etude des performances des algorithmes de localisation en fonction du centrage de la zone de recherche sur le signal à retrouver : étude des cas extrêmes tels que : les cas ambigus à deux solutions optimales (double

apparition de la valeur maximum de l'indice de confiance dans une même zone de recherche), les cas où la zone de recherche déborde à l'extérieur de l'image test.

- 7 Amélioration des performances de l'algorithme en termes de temps de calcul afin de passer d'un temps de calcul sur PC de 8 secondes à moins de 2 secondes par signal pour atteindre des objectifs de temps réel : création d'un maillage à degré de résolution variable "facteur d'optimisation 1"; sous-échantillonnage d'un "facteur d'optimisation 2".
- 8 Mise au point de 2 versions du prototype du logiciel pouvant être soumis en parallèle dans l'application pour valider/invalider le choix de certains paramètres et ainsi optimiser le temps de tests.
- 9 Mise au point d'un mode "utilisateur expert" permettant de récupérer toutes les données lors d'un test sur le terrain (images radar-gramme, paramètres, résultats intermédiaires tels les images de référence et test réhaussées, etc.) afin de pouvoir le reproduire aisément en laboratoire.

5.5.3 Résultats

Voici quelques exemples de résultats illustrant la méthodologie mise en oeuvre : les figures 5.17 et 5.18 montrent comment se déroule le suivi d'un objet d'intérêt dans une séquence d'images radar. L'utilisateur du géoradar présenté en figure 5.15 fait une première acquisition, sélectionne avec l'interface une hyperbole représentant par exemple une canalisation. Une région d'intérêt est extraite, débruitée, et réhaussée. L'utilisateur déplace son radar de quelques mètres, et souhaite retrouver la structure (canalisation) qu'il avait pointée. Une recherche automatique est réalisée, par comparaison de la région d'intérêt réhaussée à des zones de même taille dans une sous-partie suffisamment grande de l'image test. Le résultat est donné sous la forme des coordonnées dans l'image test du centre de l'objet localisé.

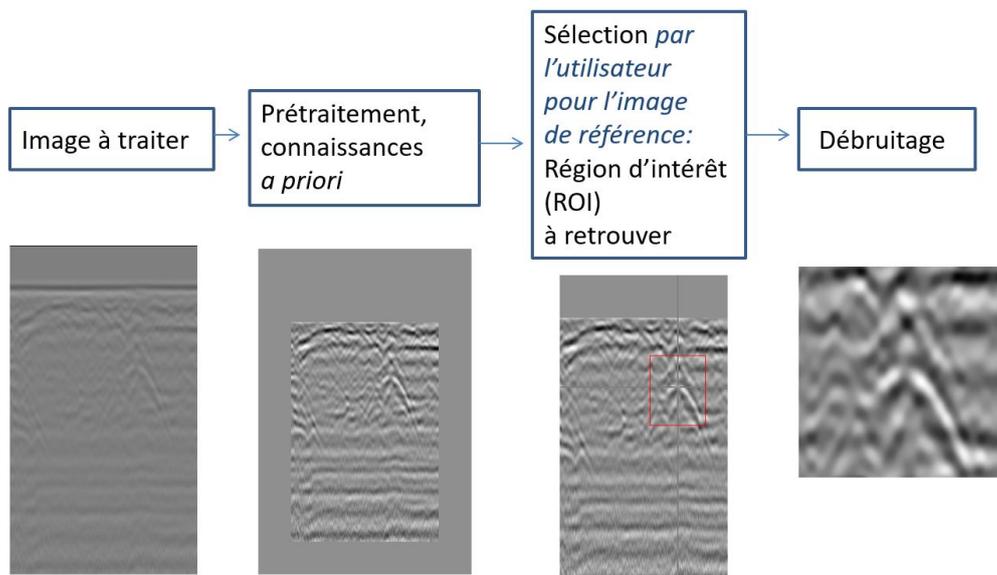


Figure 5.17 – Image de référence : prétraitement, sélection manuelle d'une hyperbole à suivre, débruitage

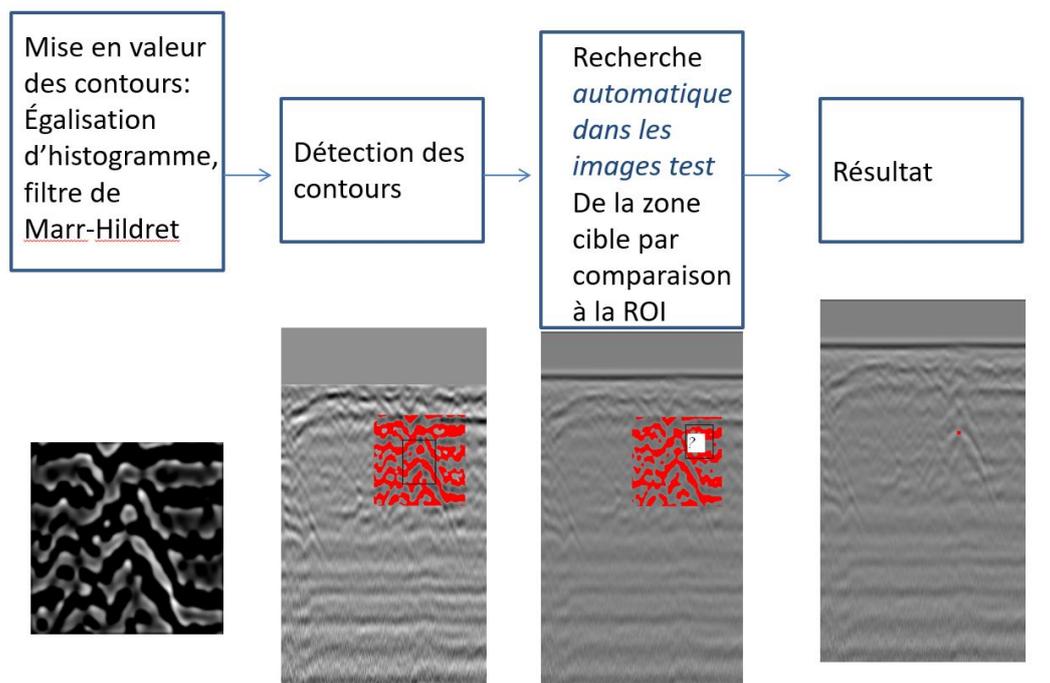


Figure 5.18 – Image de test : recherche de l'hyperbole dans une ROI

5.5.4 Bilan

Ce projet m'a permis de mettre en oeuvre un traitement robuste au bruit, naturellement présent dans les images géoradar. Une image test étant en pratique forcément différente de l'image de référence, j'ai proposé un indice de confiance fondé sur la comparaison entre l'objet d'intérêt, et l'objet retrouvé. Les mêmes traitements sont appliqués aux deux images et les deux objets sont donc comparables. La solution logicielle que j'ai proposée a été intégrée par Matole SAS dans une interface créée avec Visual Studio Express. Ce travail a inspiré un projet avec des étudiants du Master Erasmus Mundus Europhotonics (Lin ChenTe et Shiyu Deng, au début 2017).

5.6 Conclusion

Dans la veine des méthodes de transformation du contenu d'une image en un signal que j'ai créées avec Haiping Jiang, nous avons créé avec Nabil Boughnim une nouvelle signature qui, par transformation du contenu d'une image en une matrice particulière, permet d'estimer la posture d'une main. Ce travail a été mené en coopération avec IntuiSense mais est resté à l'état de preuve de concept. En revanche, le travail de Benoit Martin dans l'entreprise IntuiSense a été marqué par sa capacité à créer des algorithmes embarqués, qui fonctionnent

en conditions 'de laboratoire' dans les locaux d'Intuisense. Les perspectives de ce travail consistent à appliquer des méthodes de classification par genre à l'utilisateur une fois sélectionné. Quelques investigations ont été menées, et nous avons réalisé qu'il est important de bien régler certains paramètres liés au classifieur (machines à vecteurs de support) utilisé. Par ailleurs il nous manque une base de données de visages significative, qui est difficile à obtenir. Une fois qu'elle sera à notre disposition nous pourrions éventuellement poursuivre ces travaux avec l'entreprise IntuiSense. Je reviens aussi dans ce chapitre sur une application d'estimation de la position d'un objet. Alors que Benoit a travaillé à partir de la méthode de Viola-Jones pour estimer la position d'un visage dans une image, j'ai travaillé en contrat avec une entreprise pour détecter la position d'objets dans des images fournies par un géoradar.

Dans le cadre de la thèse de Benoit, et indépendamment de toute base de donnée, nous nous sommes concentrés sur l'estimation de paramètres de façon générale. J'ai orienté Benoit vers des méthodes d'optimisation bio-inspirées. C'est l'objet du Chapitre 6.

6 Optimisation bio-inspirée : création d'un algorithme GWO mixte

Ce travail concernant le développement et l'adaptation de méthodes d'optimisation bio-inspirées a été publié dans l'article en revue suivant : [125] ; et dans les articles en conférences suivants : [124], [113]. Il est question d'une application au démélange et débruitage de données multispectrales. Cette application fait suite à mes premiers travaux concernant le démélange spectral publié dans les articles en conférence suivants : [112], [172], [174].

6.1 Méthodes d'optimisation méta-heuristiques bio-inspirées : Introduction générale

Un problème d'optimisation consiste à maximiser ou minimiser une fonction, en choisissant de manière systématique des valeurs d'entrée issues d'un espace de recherche donné et en calculant la valeur de sortie de la fonction.

Les algorithmes d'optimisation peuvent être grossièrement divisés en deux catégories : les méthodes exactes, et les méthodes heuristiques. La différence entre ces deux catégories est que les algorithmes exacts sont conçus de façon à trouver la solution optimale à un problème en un temps fini. Les méthodes heuristiques ne le garantissent pas. En général, elles retournent un résultat qui n'est pas optimal, mais qui doit s'approcher de l'optimalité.

La méta-heuristique est un paradigme, un ensemble d'idées, de concepts, et d'opérateurs qui sont utilisés pour construire des algorithmes d'optimisation heuristiques, indépendamment de tout problème à traiter.

Une heuristique, du grec ancien *heurisko*, trouver (qui a donné *eurêka*), désigne l'art de trouver, de faire des découvertes. En mathématiques appliquées et en informatique, c'est une méthode de résolution de problèmes non fondée sur un modèle formel, et qui n'aboutit pas nécessairement à une solution optimale.

Au sein des méthodes heuristiques, on trouve les méthodes inspirées de la physique et de la chimie (gravitationnelle, recuit simulé), et les méthodes bio-inspirées (évolutives, inspirées de l'écologie, ou par essaim) [18]. C'est plutôt vers les méthodes par essaim que j'ai orienté mes recherches.

Parmi les algorithmes évolutifs, le plus connu est l'algorithme génétique (GA). Proposé par Holland en 1992 [57], cet algorithme simule la théorie de l'évolution darwiniste. Une méthode fondatrice sur les méthodes d'optimisation de

type "essaim" est le Particle Swarm Optimization (PSO) [42, 75], proposé par Kennedy et Eberhart, qui est lui-même inspiré de [145] où le terme de "essaim de particules" est utilisé pour décrire les membres d'une population ou d'un ensemble de tests. Le principe des essaims fut d'abord inspiré par le comportement des oiseaux, où un leader guide le reste de la volée. Dans [129], une méthode utilisant trois leaders plutôt qu'un seul est proposée. Cette méthode, qui s'inspire du comportement des loups gris, se nomme le Grey Wolf Optimizer (GWO). L'algorithme du GWO simule la hiérarchie de commandement et la méthode de chasse d'une horde de loups gris dans la nature. Quatre types de loups (alpha, beta, delta et omega) sont utilisés pour simuler la hiérarchie de commandement. De plus, les trois grandes étapes de la chasse sont implantées : la recherche de la proie, l'encerclement de la proie et l'attaque de la proie.

De nombreuses variantes pour améliorer les performances du GWO original ont été proposées, telles qu'une version hybride de GWO+PSO [71] et un "modified GWO" (mGWO) [131] qui inclut une règle de mise à jour modifiée. Ces méthodes ne peuvent être utilisées que pour des problèmes dans des espaces de recherche strictement continus.

Une méthode d'optimisation pour espaces de recherche discrets va chercher à estimer les meilleurs paramètres issus d'un espace de recherche discret afin de minimiser ou de maximiser une fonction.

Une célèbre méthode d'optimisation bio-inspirée pour problèmes discrets est la méthode des colonies de fourmis ou Ant Colony Optimization (ACO) [41]. Le ACO prend son inspiration dans le comportement des fourmis lorsqu'elles cherchent de la nourriture. Cet algorithme, très performant sur des problèmes de type Problème du Voyageur de Commerce, va chercher la combinaison optimale entre un ensemble de points dans un espace afin de réduire la distance de trajet. En revanche, elles supposent que deux paramètres estimés différents ne peuvent prendre la même valeur, ce qui constitue une limite, un verrou à lever. Certaines méthodes d'optimisation bio-inspirée originellement créées pour des problèmes continus ont été adaptées pour des problèmes binaires. Par exemple, différentes versions du PSO adapté pour des problèmes binaires ont été proposées [76, 16]. Une version discrète du GWO, non limitée aux problèmes binaires, a également été proposée [97] en formulant un modèle de programmation entière multi-objectifs. Pour la première fois dans [97], le calcul d'un barycentre est remplacé par la sélection aléatoire d'un leader à une itération donnée. Cependant, cette méthode présente certaines limitations. Notamment, les phases d'exploration et d'exploitation semblent avoir été inversées [125].

Certaines applications sont composées de paramètres d'entrée appartenant à des espaces de valeurs continus et discrets, la méthode d'optimisation à utiliser doit donc s'appliquer à des problèmes mixtes. Or, la littérature était assez pauvre en méthodes d'optimisation bio-inspirées mixtes [46], et il n'existait pas de mé-

thode du type GWO pour problèmes mixtes à l'époque où nous en aurions eu besoin.

La section suivante a donc pour but de proposer une méthode d'optimisation bio-inspirée capable d'optimiser des problèmes qui sont soit totalement continus, soit totalement discrets, soit mixtes.

6.2 Le mixed Grey Wolf Optimizer

Le but de cette section est de proposer un algorithme d'optimisation bio-inspirée capable de résoudre des problèmes contenant des variables discrètes et continues. Dans ce document, ces problèmes sont appelés des **problèmes mixtes**. De plus, il est pertinent d'avoir un outil capable de s'adapter au type de problème rencontré. C'est pourquoi l'algorithme proposé devra être capable de gérer des problèmes entièrement continus et des problèmes entièrement discrets en plus des problèmes mixtes. Étant plus robuste que le PSO vis à vis de l'évitement des minima locaux et de sa vitesse de calcul, le GWO a été choisi comme base pour l'algorithme proposé.

Le processus pour les variables discrètes est appliqué à un sous-ensemble de paramètres attendus, prenant leur valeur dans un espace de recherche discret, tandis que le processus pour les variables continues est appliqué, conjointement mais avec des règles de mise à jour différentes bien sûr, aux paramètres prenant leur valeur dans un espace de recherche continu.

Tout d'abord, en sous-section 6.2.1, un algorithme d'optimisation discrète nommé Improved Discrete GWO (IDGWO, GWO discret amélioré) est proposé. Bien qu'inspiré du GWO classique, son pendant continu n'est pas exactement comme la version classique du GWO. Ce pendant continu, nommé Global Continuous GWO (GWO continu global), est expliqué en sous-section 6.2.2. Ces deux méthodes sont combinées pour créer un mixedGWO capable de gérer des problèmes continus, discrets et mixtes. Enfin, en sous-section 6.2.3, le mixedGWO proposé est décrit plus en détails.

6.2.1 Improved discrete Grey Wolf Optimizer

Les méthodes d'optimisation bio-inspirées discrètes existantes sont souvent destinées à des problèmes binaires ou des problèmes spécifiques [41, 96, 97]. N'étant donc pas applicables pour des problèmes généraux, il est pertinent de développer une version discrète du GWO qui doit être applicable lorsque, par exemple, il peut y avoir plusieurs fois la même valeur dans les solutions trouvées aux diverses inconnues. Ce n'est pas le cas pour un problème de type 'voyageur

de commerce' [41].

L'idée du Improved Discrete GWO (IDGWO) est que les espaces de recherches discrets sont définis sous forme de vecteurs de *valeurs*, et que des vecteurs d'*indices* sont également définis. Une particule ou un "loup" à l'itération *iter* est défini par $\mathbf{x}_q^k(iter)$ et contient N composantes qui sont les valeurs candidates des paramètres attendus.

Une valeur de la composante i avec un index h_i dans \mathbf{d}_i^{ind} est définie par $K_i^{h_i}$. Par exemple, pour le vecteur de valeurs $\mathbf{x}_q^k(iter) = [K_1^2, \dots, K_N^5]^T$, le vecteur d'indices associé sera $\mathbf{h}_q(iter) = [2, \dots, 5]^T$.

L'Algorithme 1 détaille le processus global du IDGWO tandis que dans l'Algorithme 2, la loi de mise à jour d'un loup d'indice $q \in [1, \dots, Q]^T$ à l'itération *iter* est détaillée.

Algorithm 1 Pseudo-code : Improved Discrete Grey Wolf Optimization pour l'estimation multi-paramètres

Entrées : fonction de fitness, nombre N de paramètres attendus, faible facteur ϵ défini par l'utilisateur pour arrêter l'algorithme, nombre maximum d'itérations T_{max} .
Pour chaque paramètre indexé par $i = 1, \dots, N$: l'espace de recherche \mathbf{d}_i^{ind} avec H_i valeurs possibles.

1. Initialiser la valeur d'itération $iter = 1$.
Créer un ensemble initial de vecteurs d'indices $\mathbf{h}_q(iter)$, $q = 1, \dots, Q$. Pour chaque indice i compris entre 1 et N , un composant $h_i(iter)$ de $\mathbf{h}_q(iter)$ est une valeur entière comprise entre 1 et H_i .
Création d'une horde initiale composée de Q loups $\mathbf{x}_q^k(iter)$, $q = 1, \dots, Q$ avec les N paramètres attendus nécessaires. Cette population initiale se présente sous la forme d'une matrice avec Q lignes et N colonnes.
2. Calculer la valeur de la fonction de fitness $f(\mathbf{x}_q^k(iter))$ de chaque loup $\mathbf{x}_q^k(iter)$, $q = 1, \dots, Q$.
3. Trier les loups selon leur valeur de fitness et mettre à jour les 1ère, 2ème et 3ème meilleures valeurs de fitness : stocker les vecteurs d'indices \mathbf{h}_α , \mathbf{h}_β , \mathbf{h}_δ et les vecteurs de valeurs \mathbf{x}_α^k , \mathbf{x}_β^k , \mathbf{x}_δ^k correspondants.
4. Si $a > 1$, sélectionner deux loups $\rho1$ et $\rho2$ aléatoirement parmi la horde de Q loups, avec $\rho1 \neq \rho2$. Stocker les vecteurs d'indices $\mathbf{h}_{\rho1}$, $\mathbf{h}_{\rho2}$ et les vecteurs de valeurs $\mathbf{x}_{\rho1}^k$, $\mathbf{x}_{\rho2}^k$ correspondants.
Sinon, si $a \leq 1$, aller à l'étape 5.
5. Pour chaque loup q , $q = 1, \dots, Q$, avec les vecteurs de valeurs $\mathbf{x}_q^k(iter)$ et les vecteur d'indices $\mathbf{h}_q(iter)$:
Appliquer Algorithme 2.
6. Remplacer la population actuelle avec la nouvelle, obtenue à l'étape 5.
7. Si $iter < T_{max}$ or $f(\mathbf{x}_q^k(iter)) > \epsilon$, incrémenter $iter$, et aller à l'étape 2.

Sortie : Valeurs des paramètres estimés $\widehat{K}_1, \widehat{K}_2, \dots, \widehat{K}_N$ contenues dans \mathbf{x}_α^k .

Algorithm 2 Pseudo-code : Règles de mise à jour du Improved Discrete Grey Wolf Optimization pour l'estimation multi-paramètres

Entrées : Vecteur d'indices $\mathbf{h}_q(iter)$, vecteur de valeurs $\mathbf{x}_q^k(iter)$.

1. Choix du leader :
 - a) Soit \mathbf{x}_l^k le vecteur de valeurs du leader, choisi aléatoirement parmi \mathbf{x}_α^k , \mathbf{x}_β^k , \mathbf{x}_δ^k , $\mathbf{x}_{\rho1}^k$, et $\mathbf{x}_{\rho2}^k$. Le processus de selection du leader est détaillé dans les Eqs. (6.1) et (6.2).
 - b) Stocker le vecteur d'indices correspondant à \mathbf{x}_l^k dans un vecteur noté \mathbf{h}_l .
2. Mise à jour du loup q :
Pour chaque indice $i = 1, \dots, N$
 - a) Calculer la composante $h_i(iter + 1)$.
 - b) Calculer la composante $x_i(iter + 1)$.

Ce processus est détaillé dans les Eqs. (6.3), (6.5) et (6.6)
3. Stocker les N composantes obtenues aux étapes 2a et 2b :
 - a) Stocker le nouveau vecteur d'indices :
 $\mathbf{h}_q(iter + 1) = [h_1(iter + 1), \dots, h_i(iter + 1), \dots, h_N(iter + 1)]^T$.
 - b) Stocker le nouveau vecteur de valeurs :
 $\mathbf{x}_q^k(iter + 1) = [x_1(iter + 1), \dots, x_i(iter + 1), \dots, x_N(iter + 1)]^T$.

Sortie : $\mathbf{h}_q(iter + 1)$, $\mathbf{x}_q^k(iter + 1)$

Voici quelques détails sur la loi de mise à jour de l'IDGWO :

À l'étape 1, si $a > 1$, le leader est choisi aléatoirement parmi les loups α , β , δ , $\rho1$ et $\rho2$:

$$\mathbf{x}_l^k = \begin{cases} \mathbf{x}_\alpha^k & si \quad r \leq \frac{a}{10} \\ \mathbf{x}_\beta^k & si \quad r > \frac{a}{10} \quad et \quad r \leq \frac{2a}{10} \\ \mathbf{x}_\delta^k & si \quad r > \frac{2a}{10} \quad et \quad r \leq \frac{3a}{10} \\ \mathbf{x}_{\rho1}^k & si \quad r > \frac{3a}{10} \quad et \quad r \leq \frac{4a}{10} \\ \mathbf{x}_{\rho2}^k & si \quad r > \frac{4a}{10} \quad et \quad r \leq \frac{5a}{10} \\ \mathbf{x}_\alpha^k & si \quad r > \frac{5a}{10} \end{cases} \quad (6.1)$$

avec r valeur aléatoire dans \mathbb{R} , comprise entre 0 et 1.

si $a \leq 1$, le leader est choisi aléatoirement parmi les loups α , β , et δ :

$$\mathbf{x}_i^k = \begin{cases} \mathbf{x}_\alpha^k & \text{si } r \leq \frac{a}{6} \\ \mathbf{x}_\beta^k & \text{si } r > \frac{a}{6} \\ \mathbf{x}_\delta^k & \text{si } r > \frac{2a}{6} \\ \mathbf{x}_\alpha^k & \text{si } r > \frac{3a}{6} \end{cases} \quad \text{et } r \leq \frac{2a}{6} \quad \text{et } r \leq \frac{3a}{6} \quad (6.2)$$

avec r valeur aléatoire dans \mathbb{R} , comprise entre 0 et 1.

À l'étape 2a, chaque composante du vecteur d'indices $\mathbf{h}_q(\text{iter})$ est mise à jour comme suit :

Pour chaque indice $i, i = 1, \dots, N$:

$$h_i(\text{iter} + 1) = (h_i(\text{iter}) + \Delta \operatorname{sgn}(h_i^l - h_i(\text{iter}))) \bmod H_i \quad (6.3)$$

avec :

- $\operatorname{sgn}(\cdot)$ correspond à la fonction *signe*, de telle manière que $\operatorname{sgn}(z) = -1$ si $z < 0$, $\operatorname{sgn}(z) = 0$ si $z = 0$, et $\operatorname{sgn}(z) = 1$ si $z > 0$ pour n'importe quelle valeur réelle z ;
- \bmod correspond à l'opérateur "Modulo", défini comme suit : pour n'importe quelle valeur réelle $u \in \mathbb{R}_+$ et $v \in \mathbb{R}_+^*$:

$$u \bmod v = \begin{cases} u - v \lfloor u/v \rfloor & \text{si } u \neq v \\ v & \text{si } u = v, \text{ ou } u = 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

où $\lfloor \cdot \rfloor$ correspond à la partie entière.

- Δ est calculé comme suit :

$$\Delta = \begin{cases} 1 & \text{si } \phi \leq \frac{a}{2\Omega(H_i)} \\ 2 & \text{si } \phi > \frac{a}{2\Omega(H_i)} \quad \text{et } \phi \leq \frac{2a}{2\Omega(H_i)} \\ \vdots & \\ n_i & \text{si } \phi > \frac{(n_i-1)a}{2\Omega(H_i)} \quad \text{et } \phi \leq \frac{n_i a}{2\Omega(H_i)} \\ \vdots & \\ \Omega(H_i) - 1 & \text{si } \phi > \frac{(\Omega(H_i)-2)a}{2\Omega(H_i)} \quad \text{et } \phi \leq \frac{(\Omega(H_i)-1)a}{2\Omega(H_i)} \\ \Omega(H_i) & \text{si } \phi > \frac{(\Omega(H_i)-1)a}{2\Omega(H_i)} \quad \text{et } \phi \leq \frac{\Omega(H_i)a}{2\Omega(H_i)} \\ 1 & \text{si } \phi > \frac{\Omega(H_i)a}{2\Omega(H_i)} \end{cases} \quad (6.5)$$

où ϕ est une valeur aléatoire dans \mathbb{R} , comprise entre 0 et 1, et :

$$\Omega(H_i) = \begin{cases} \frac{H_i}{2} & \text{si } H_i \text{ pair} \\ \frac{H_i+1}{2} & \text{si } H_i \text{ impair} \end{cases}$$

Enfin, à l'étape 2b, chaque composante du vecteur de valeurs mis à jour $\mathbf{x}_q^k(\text{iter} + 1)$ est calculée suivant l'Eq. (6.6) puis stockée dans le vecteur $\mathbf{x}_q^k(\text{iter} + 1)$.

$$x_i(\text{iter} + 1) = \mathbf{d}_i^{\text{val}}(h_i(\text{iter} + 1)) \quad (6.6)$$

6.2.2 Global Continuous Grey Wolf Optimizer

L'Algorithme 3 détaille la loi de mise à jour du pendant continu de l'IDGWO : le Global Continuous GWO (GCGWO), et plus particulièrement la mise à jour d'un paramètre d'indice $i \in [1, \dots, M]^T$ pour un loup d'indice $q \in [1, \dots, Q]^T$ à l'itération iter .

Algorithm 3 Pseudo-code : Global Continuous Grey Wolf Optimization pour l'estimation multi-paramètres

Entrées : $x_i(\text{iter})$, $i^{\text{ème}}$ composante d'un loup $\mathbf{x}_q^k(\text{iter})$ à l'itération iter ; les leaders α , β , et δ .

1. Calculer les contributions y_i^α , y_i^β , et y_i^δ respectivement des loups α , β , et δ par rapport au $q^{\text{ème}}$ loup.
Ce calcul est détaillé dans les Eqs. (6.9) et (6.10).
2. si $a > 1$ aller à l'étape 3, sinon si $a \leq 1$ aller à l'étape 4
3. Calculer les contributions $y_i^{\rho1}$ et $y_i^{\rho2}$ respectivement des loups $\rho1$ et $\rho2$ par rapport au $q^{\text{ème}}$ loup.
Ce calcul est détaillé dans les Eqs. (6.9) et (6.10).
4. Calculer la nouvelle position de la $i^{\text{ème}}$ composante du $q^{\text{ème}}$ loup :

si $a > 1$:

$$x_i(\text{iter} + 1) = \frac{1}{5}(y_i^\alpha + y_i^\beta + y_i^\delta + y_i^{\rho1} + y_i^{\rho2}) \quad (6.7)$$

sinon si $a \leq 1$:

$$x_i(\text{iter} + 1) = \frac{1}{3}(y_i^\alpha + y_i^\beta + y_i^\delta) \quad (6.8)$$

Sortie : $x_i(\text{iter} + 1)$

La nouvelle position mentionnée à l'étape 4 de l'Algorithme 3 est calculée comme la contribution équivalente des leaders α , β et δ . Si $a > 1$, les contributions des loups aléatoires $\rho1$ et $\rho2$ sont aussi utilisées. Ces contributions sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} y_i^\alpha = x_i^\alpha - b_1 \cdot d_i^\alpha, \\ y_i^\beta = x_i^\beta - b_2 \cdot d_i^\beta, \\ y_i^\delta = x_i^\delta - b_3 \cdot d_i^\delta, \\ y_i^{\rho1} = x_i^{\rho1} - b_4 \cdot d_i^{\rho1}, \\ y_i^{\rho2} = x_i^{\rho2} - b_5 \cdot d_i^{\rho2} \end{cases} \quad (6.9)$$

avec :

$$\begin{cases} d_i^\alpha = |c_1 \cdot x_i^\alpha - x_i(ite\text{r})|, \\ d_i^\beta = |c_2 \cdot x_i^\beta - x_i(ite\text{r})|, \\ d_i^\delta = |c_3 \cdot x_i^\delta - x_i(ite\text{r})|, \\ d_i^{\rho1} = |c_4 \cdot x_i^{\rho1} - x_i(ite\text{r})|, \\ d_i^{\rho2} = |c_5 \cdot x_i^{\rho2} - x_i(ite\text{r})| \end{cases} \quad (6.10)$$

où les scalaires b et c sont calculés de la même façon que dans le GWO classique : $b = 2ar_1 - a$ et $c = 2r_2$. Dans ces expressions, r_1 et r_2 sont des scalaires aléatoires compris entre 0 et 1.

6.2.3 Extension au mixedGWO

Dans un même problème, les paramètres à utiliser n'appartiennent pas forcément au même espace de recherche. Certains de ces paramètres peuvent être continus tandis que les autres seront discrets. De plus, ces paramètres peuvent être interdépendants et doivent donc être estimés conjointement. De tels problèmes seront appelés des problèmes mixtes. L'association du IDGWO, expliqué en sous-section 6.2.1, et du GCGWO, expliqué en sous-section 6.2.2, permet de proposer un algorithme d'optimisation bio-inspiré capable de gérer des problèmes mixtes : le mixedGWO. Les notations suivantes seront utilisées spécifiquement pour le mixedGWO, en plus des notations présentées dans la nomenclature en début de manuscrit :

- En présumant que le $i^{\text{ème}}$ paramètre K_i soit une valeur issue d'un espace de recherche continu, sa valeur minimum possible est notée K_i^{min} et sa valeur maximum possible est notée K_i^{max} ;
- L'intervalle de valeurs possibles pour le paramètre K_i dans un espace de recherche continu est noté $\mathbf{d}_i^{\text{val}} = [K_i^{\text{min}}; K_i^{\text{max}}]^T$.

L'algorithme 4 décrit la méthode d'optimisation mixedGWO proposée.

Algorithm 4 Pseudo-code : Mixed Grey Wolf Optimization pour l'estimation multi-paramètres

Entrées : fonction de fitness, nombre N de paramètres attendus, faible facteur ϵ défini par l'utilisateur pour arrêter l'algorithme, nombre maximum d'itérations T_{max} .

1. Initialiser la valeur d'itération $iter = 1$. Créer un ensemble initial de vecteurs d'indices $\mathbf{h}_q(iter)$, $q = 1, \dots, Q$. Pour chaque indice i compris entre 1 et N , une composante $h_i(iter)$ de $\mathbf{h}_q(iter)$ est une valeur entière comprise entre 1 et H_i . Création d'une horde initiale composée de Q loups $\mathbf{x}_q^k(iter)$, $q = 1, \dots, Q$ avec les N paramètres attendus nécessaires. Cette population initiale se présente sous la forme d'une matrice avec Q lignes et N colonnes ;
2. Calculer la valeur de la fonction de fitness $f(\mathbf{x}_q^k(iter))$ de chaque loup $\mathbf{x}_q^k(iter)$, $q = 1, \dots, Q$;
3. Trier les loups selon leur valeur de fitness et mettre à jour les loups α , β , et δ qui possèdent respectivement la meilleure, 2ème, et 3ème valeurs de fitness. Stocker leur position dans les vecteurs \mathbf{x}_α^k , \mathbf{x}_β^k , et \mathbf{x}_δ^k respectivement. Dans le cas des paramètres discrets, stocker également les vecteurs d'indices correspondants \mathbf{h}_α , \mathbf{h}_β et \mathbf{h}_δ ;
4. Si $a > 1$, sélectionner deux loups $\rho1$ et $\rho2$, aléatoirement parmi la horde de Q loups, avec $\rho1 \neq \rho2$. Stocker les vecteurs de valeurs $\mathbf{x}_{\rho1}^k$, $\mathbf{x}_{\rho2}^k$ et, pour les paramètres discrets, les vecteurs d'indices correspondants $\mathbf{h}_{\rho1}$ et $\mathbf{h}_{\rho2}$. Sinon si $a \leq 1$, aller à l'étape 5 ;
5. Répéter les étapes pour chaque loup $\mathbf{x}_q^k(iter)$, $q = 1, \dots, Q$:
Pour chaque composant $x_i(iter)$ avec $i = 1, \dots, N$:
 - a) si le $i^{\text{ème}}$ paramètre K_i est un paramètre continu, alors aller à l'étape 5b, sinon si K_i est un paramètre discret, alors aller à l'étape 5c ;
 - b) Appliquer la loi de mise à jour continue proposée dans l'Algorithme 3. Sauter les étapes 5c à 5e ;
 - c) Choisir le leader \mathbf{x}_j^k , et le coefficient de déplacement Δ qui seront utilisés pour les paramètres discrets. Pour cela, se référer aux Eqs. (6.1), (6.2), (6.3), et (6.5) ;
 - d) Appliquer l'étape 2a de l'Algorithme 1 afin d'obtenir $h_i(iter + 1)$ comme indiqué dans l'Eq. (6.3) ;
 - e) Appliquer l'étape 2b de l'Algorithme 1 afin d'obtenir $x_i(iter + 1)$ comme indiqué dans l'Eq. (6.6) ;
6. Remplacer la population actuelle avec la nouvelle, obtenue à l'étape 5 ;
7. Si $iter < T_{max}$ ou $f(\mathbf{x}_q^k(iter)) > \epsilon$, incrémenter $iter$ et aller à l'étape 2.

Sortie : Valeurs des paramètres estimés $\widehat{K}_1, \widehat{K}_2, \dots, \widehat{K}_N$.

Dans la suite, une distinction sera faite entre deux versions du mixedGWO, dépendantes de l'expression du paramètre a . Dans le mixedGWO simple, le paramètre a est calculé comme suit :

$$a = 2\left(1 - \frac{iter^\eta}{T_{max}^\eta}\right) \quad (6.11)$$

Dans une seconde version appelée adaptive mixed GWO (et notée amixedGWO), le paramètre a est calculé comme suit :

$$a = \begin{cases} 2\left(1 - \frac{iter^\eta}{(T_{max}/2)^\eta}\right) & \text{si } iter \leq T_{max}/2 \\ 2\left(1 - \frac{(iter - T_{max}/2)^{\frac{1}{\eta}}}{(T_{max}/2)^{\frac{1}{\eta}}}\right) & \text{si } iter > T_{max}/2 \end{cases} \quad (6.12)$$

La Fig. présente l'évolution des valeurs de a calculées comme en Eq. (6.12). Cette figure permet de réaliser qu'autant d'itérations sont dédiées à l'exploration ($a \geq 1$) qu'à l'exploitation ($a < 1$).

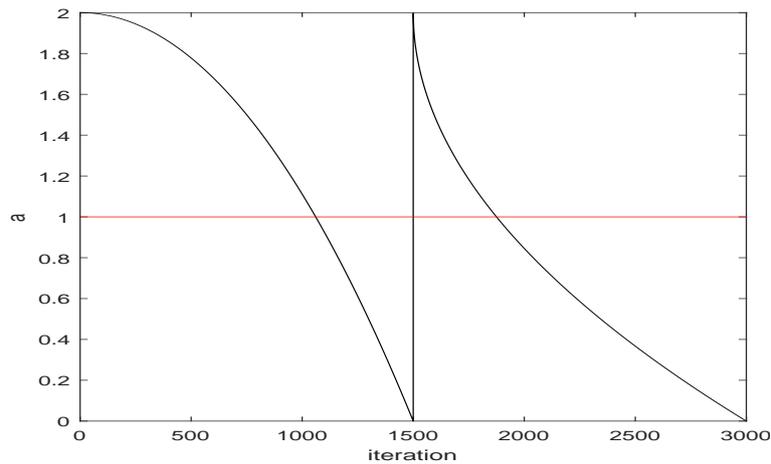


Figure 6.1 – Valeurs de a en fonction de l'indice d'itération pour $T_{max} = 3000$ et $\eta = 2$

Une valeur élevée de η permet une concentration sur l'exploration de l'espace de recherche pendant une première phase, de $iter = 1$ à $iter = T_{max}/2$; et une concentration sur l'exploitation pendant une seconde phase, de $iter = T_{max}/2 + 1$ à $iter = T_{max}$. En quelque sorte l'expression de a s'adapte, selon que l'on soit encore loin ou déjà près de la fin de l'exécution de l'algorithme. On scinde ainsi l'algorithme en deux étapes : dans la première, l'exploration est privilégiée ; dans la deuxième, c'est l'exploitation qui est privilégiée. Sur l'ensemble des itérations, la même proportion en est dédiée à l'exploration et à l'exploitation.

6.3 Application du GWO mixte à l'estimation simultanée de paramètres pour le débruitage et le démélange de données multispectrales

6.3.1 Introduction

Habituellement, les travaux en traitement d'images s'effectuent sur des images composées des 3 couches principales Rouge, Vert et Bleu (RVB), qui correspondent respectivement aux longueurs d'onde de 690 nm, 550 nm et 450 nm dans le spectre de la lumière. En imagerie multi-spectrale et hyper-spectrale, les images sont composées de plus de couches que les 3 couches basiques. De plus, ces couches ne sont pas limitées à la partie visible du spectre et peuvent être issues de l'Ultra-Violet ou de l'Infra-Rouge par exemple. Afin d'appliquer un démélange de spectre sur une image multi-spectrale ou hyper-spectrale, l'image à traiter doit d'abord être débruitée, et cela ne doit pas être fait au hasard. En effet, une image trop fortement débruitée perdrait des informations nécessaires au démélange de spectre tandis qu'une image pas assez débruitée risquerait de contenir des informations surnuméraires qui peuvent gêner l'estimation des coefficients de mélange (ou abondances) impliqués dans la problématique du démélange. Il serait donc intéressant de pouvoir effectuer conjointement et simultanément le débruitage et le démélange de spectres afin de trouver le meilleur équilibre entre ces deux traitements.

L'objet de la section 6.3 est donc de montrer que le mixedGWO proposé est adapté à la résolution d'un problème de débruitage et le démélange simultané d'images multi-spectrales.

6.3.2 Description de l'application proposée

Les images multi-spectrales et hyper-spectrales sont aujourd'hui utilisées dans des applications de télédétection. Dans ce contexte, des capteurs dédiés ont été développés, tels que le capteur AVIRIS [52] ou le capteur ROSIS [58]. Une image multi-spectrale est obtenue en sélectionnant certaines bandes des images hyper-spectrales obtenues par ces capteurs aériens. La plupart des images multi-spectrales aériennes sont polluées par du bruit [89, 92] dû aux radiations solaires ou à de la diffusion atmosphérique [77], par exemple.

En imagerie multi-spectrale, le débruitage est souvent l'étape préliminaire avant de pouvoir effectuer des traitements de plus haut niveau tels que de la détection de cible [89] ou du démélange de spectre [40]. Dans ce dernier cas, un des problèmes actuels est de trouver le meilleur compromis entre l'efficacité du processus de débruitage sur l'image étudiée et la précision de démélange de spectres sur cette même image. Une image multi-spectrale est en effet un tableau de don-

nées multidimensionnel, donc un tenseur tel qu'on l'entend dans ce manuscrit. La section 7.1 de ce manuscrit comprendra une introduction au filtrage tensoriel, qui n'est pas au coeur de l'application considérée ici. On retiendra cependant d'ores-et-déjà qu'un spectre est un vecteur que l'on peut noter $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{l_3}$ (un vecteur de l_3 nombres réels), que l'on considère extrait d'une image multi-spectrale modélisée comme un tenseur \mathcal{X} . Pour le spectre \mathbf{y} , un démélange supervisé vise à estimer les contributions de la signature spectrale des matériaux présents dans l'image (appelés *endmembers*) pour une partie ou tous les pixels de l'image. Ces contributions sont aussi appelées abondances. Un démélange supervisé signifie que les endmembers contenus dans l'image ont été estimés par un algorithme d'extraction d'endmembers tel que la Vertex Component Analysis [134]. Un modèle de mélange linéaire impliquant deux endmembers est tel que suit :

$$\mathbf{y}(\lambda) = (1 - \lambda)\mathbf{s1} + \lambda\mathbf{s2} + \mathbf{n} \quad (6.13)$$

où λ est un coefficient de mélange, $\mathbf{s1}$ et $\mathbf{s2}$, dans \mathbb{R}^{l_3} , sont les deux endmembers et \mathbf{n} est un vecteur de bruit.

Dans ce cas d'un modèle de mélange linéaire, le problème de démélange, supervisé ou non, est simplement géré par une factorisation de matrice non-négative [142]. Nous voulons prouver les capacités de notre mixedGWO à résoudre notre problème, avec un modèle de mélange non-linéaire. Nous présumons que les spectres des endmembers sont connus, mais nous souhaitons déterminer, parmi les deux types de mélanges non-linéaires possibles, quel modèle correspond le mieux aux données.

Le modèle considéré pour le mélange de spectres est noté $\mathbf{y}(f, \lambda_1, \lambda_2)$, où f est le modèle de mélange, valant f_0 ou f_1 .

Le premier modèle est le modèle de mélange polynomial post-non-linéaire [10] :

$$\mathbf{y}(f_0^{mix}, \lambda_1, \lambda_2) = f_0^{mix}(\lambda_1, \lambda_2) = \mathbf{g}^{mix}(\mathbf{s}(\lambda_1), \lambda_2) + \mathbf{n} \quad (6.14)$$

où $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{l_3}]^T$ suit un modèle de mélange linéaire des deux endmembers $\mathbf{s1}$ et $\mathbf{s2}$:

$$\mathbf{s}(\lambda_1) = (1 - \lambda_1)\mathbf{s1} + \lambda_1\mathbf{s2} \quad (6.15)$$

et \mathbf{g}^{mix} est une non-linéarité polynomiale du second ordre :

$$\begin{aligned} \mathbf{g}^{mix} : [0; 1]^{l_3} &\rightarrow \mathbb{R}^{l_3} \\ \mathbf{s} &\mapsto [s_1 + \lambda_2 s_1^2, \dots, s_{l_3} + \lambda_2 s_{l_3}^2]^T \end{aligned} \quad (6.16)$$

Le second modèle est le modèle bilinéaire généralisé [55] :

$$\mathbf{y}(f_1^{mix}, \lambda_1, \lambda_2) = f_1^{mix}(\lambda_1, \lambda_2) = (1 - \lambda_1 - \lambda_2)\mathbf{s1} + \lambda_1\mathbf{s2} + \lambda_2\mathbf{s1s2} + \mathbf{n} \quad (6.17)$$

Dans les Eqs. (6.14) et (6.17), λ_1 et λ_2 appartiennent à $[0; 1]$. Il est important

de noter que les deux modèles se réduisent à un modèle linéaire si $\lambda_2 = 0$, ce qui signifie qu'ils peuvent être similaires, particulièrement dans le cas de λ_2 très petit.

En appliquant conjointement le débruitage et le démelange supervisé sur une image multi-spectrale, les images pourraient être débruitées de manière à atteindre le meilleur résultat de démelange possible. Pour cela, il est très important de choisir le critère à minimiser adéquat.

6.3.2.1 Critère proposé et critères d'évaluation

Avec la méthode proposée du amixedGWO (la version adaptative du mixedGWO), nous proposons de minimiser le critère suivant :

$$J^{LS}(K_1, K_2, K_3, f, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{l_1 l_2 l_3} \|\mathcal{X}_1 - \hat{\mathcal{X}}(K_1, K_2, K_3)\|^2 + \frac{1}{l_3} \|\mathbf{y}(f^{mix}, \lambda_1, \lambda_2) - \hat{\mathbf{y}}(K_1, K_2, K_3)\|^2 \quad (6.18)$$

où le tenseur \mathcal{X}_1 est une estimée grossière de \mathcal{X} , et $\hat{\mathcal{X}}(K_1, K_2, K_3)$ est l'estimée fourni par le Filtrage de Wiener Multidimensionnel (MWF) appliqué à \mathcal{R} avec les valeurs de rang K_1, K_2, K_3 . Le vecteur $\mathbf{y}(f, \lambda_1, \lambda_2)$ est le modèle spectral, où f, λ_1 , et λ_2 doivent être estimés, et le vecteur $\hat{\mathbf{y}}(K_1, K_2, K_3)$ est un spectre, dont la position est connue, extrait de l'estimé du tenseur $\hat{\mathcal{X}}(K_1, K_2, K_3)$.

Les performances de la version adaptative du mixedGWO, le amixedGWO, ont été évaluées sur des images multi-spectrales issues de la base de données 'PaviaU scene' [58]. Ces images possèdent 103 bandes spectrales de longueurs d'onde comprises entre 420 nm et 850 nm.

Dans cette expérience, les valeurs de l'image attendue \mathcal{X} et du mélange de spectre \mathbf{y} ont été échelonnées entre 0 et 1. Le mélange de spectre a été généré avec la réflexion de la végétation pour $\mathbf{s1}$ et la réflexion du sol pour $\mathbf{s2}$. Le spectre résultant a été positionné à un endroit spécifique de l'image. La connaissance de cette position était nécessaire afin de pouvoir extraire le spectre de l'image débruitée. Les paramètres de mélange attendus ont été fixés à : $f^{mix} = f_0^{mix} = 0, \lambda_1 = 0.15, \lambda_2 = 0.41$.

Les résultats de débruitage obtenus ont été évalués par leur valeur de SNR avec $SNR = 10 \log_{10}(\frac{\|\mathcal{X}\|^2}{\|\mathcal{X} - \hat{\mathcal{X}}\|^2})$.

Les images ont été bruitées artificiellement avec un bruit blanc réparti aléatoirement. La valeur de SNR originel est noté SNR_{in} et les valeurs de chaque expériences sont données en dB.

Les résultats de démelange ont été évalués en terme d'erreur de reconstruction RE entre \mathbf{y} et $\hat{\mathbf{y}}$ avec : $RE = \sqrt{\frac{1}{l_3} \|\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}\|^2}$.

Enfin, les performances du amixedGWO ont été comparées aux méthodes de l'état de l'art : PSO [75], GWO [131], ABC [72], TSA [82], GA [57] et SA [94]. Ces méthodes étant originellement dédiées à des espaces de recherche continus, un arrondi a été effectué sur les paramètres devant être des valeurs entières. Le nombre d'agents de recherche de chacune de ces méthodes a été choisi de manière à ce que chacune nécessite le même temps de calcul pour pouvoir effectuer $T_{max} = 20$ itérations.

Pour rappel, les paramètres à estimer étaient les paramètres de rang K_1 , K_2 et K_3 , le type de modèle de mélange f^{mix} et les coefficients de mélange λ_1 et λ_2 . Ces paramètres et leurs espaces de recherches sont résumés en Table 6.1.

Indice du paramètre à estimer i	Espace de recherche		
	H_i	\mathbf{d}_i^{ind}	\mathbf{d}_i^{val}
1,2,3	$\min(l_i, 8)$	$[1, 2, \dots, l_i]^T$	$[1, \frac{l_i}{H_i}, 2\frac{l_i}{H_i}, \dots, l_i]^T$
4	2	$[0, 1]^T$	$[f_0^{mix}, f_1^{mix}]^T$
5,6	•	•	$[0, 1]^T$

Table 6.1 – Espaces de recherche pour les méthodes d'optimisation. Le symbole • signifie "inutile"

Le nombre de valeurs H_i dans l'espace de recherche pour les rangs K_i , $i = 1, \dots, 3$ est soit 8, soit la taille de l'image l_i , $i = 1, \dots, 3$ si $l_i \leq 16$. Notons qu'il n'y a que deux valeurs possibles pour le modèle de mélange f^{mix} , et que les valeurs possibles pour les coefficients de mélange λ_1 et λ_2 sont réelles et comprises entre 0 et 1.

6.3.2.2 Résultats expérimentaux

Les résultats fournis dans cette sous-section ont été obtenus sur des images extraites de la base de donnée PaviaU. Les résultats numériques ont été calculés sur une petite image tandis que les résultats visuels ont été calculés sur une grande image. La Figure 6.2 montre les images utilisées sans bruit (noise-free), et la Figure 6.3 montre les deux endmembers, et le spectre attendu, obtenus avec les paramètres $f^{mix} = f_1^{mix} = 0$, $\lambda_1 = 0.15$, $\lambda_2 = 0.41$.

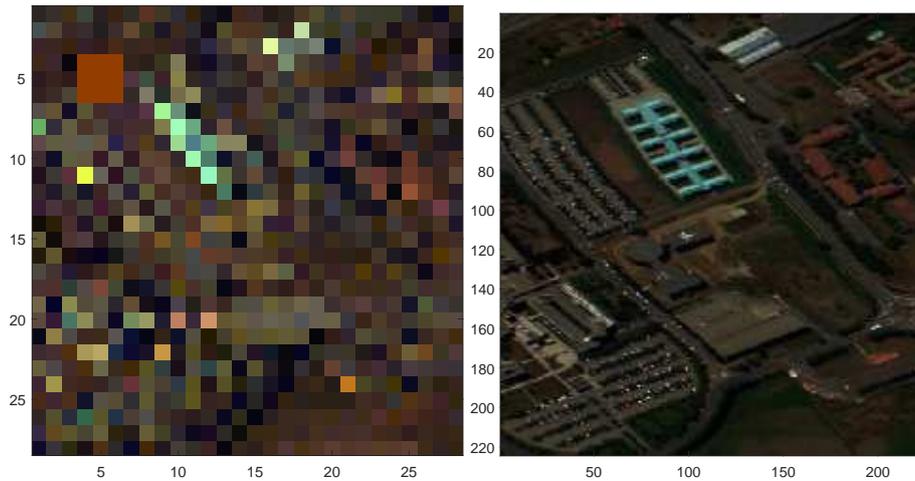


Figure 6.2 – PaviaU $32 \times 32 \times 4$ et PaviaU $256 \times 256 \times 103$: images non bruitées

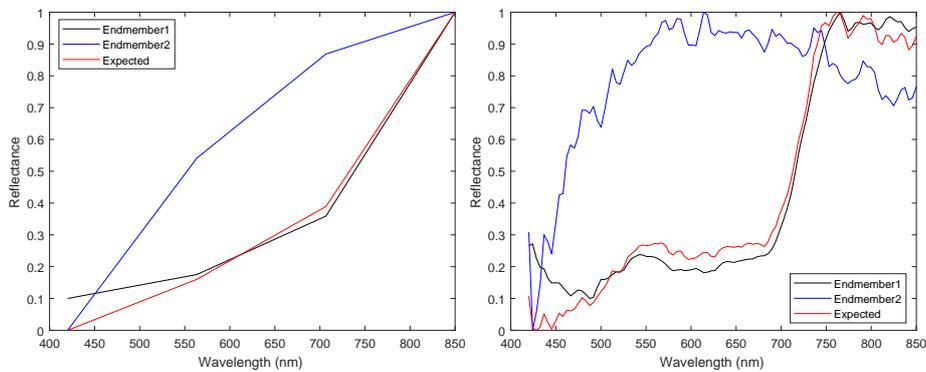


Figure 6.3 – PaviaU $32 \times 32 \times 4$ et PaviaU $256 \times 256 \times 103$: endmembers **s1** (noir) et **s2** (bleu), et le spectre attendu **y** (rouge)

Dans la suite de cette sous-section, un cas réel a été étudié : l'image \mathcal{R} a été bruitée avec une valeur de SNR finie, et l'image de référence a été obtenue avec un filtrage de Wiener appliqué dans le domaine de Fourier. Le débruitage a été appliqué bande par bande, *i.e.* pour chaque bande de l'image étudiée. Nous avons appliqué notre méthode sur une grande image bruitée avec cinq valeurs de SNR différentes : $SNR_{in} = 0, 5, 10, 15,$ et 20 dB. Pour $SNR_{in} = 10$, des résultats visuels sont donnés (voir Figures 6.4, 6.5 et 6.6) ainsi que les spectres obtenus (voir Figures 6.7 et 6.8) et les courbes de convergence moyennes obtenues pour chaque méthode sur $M = 3$ réalisations (voir Figure 6.9).

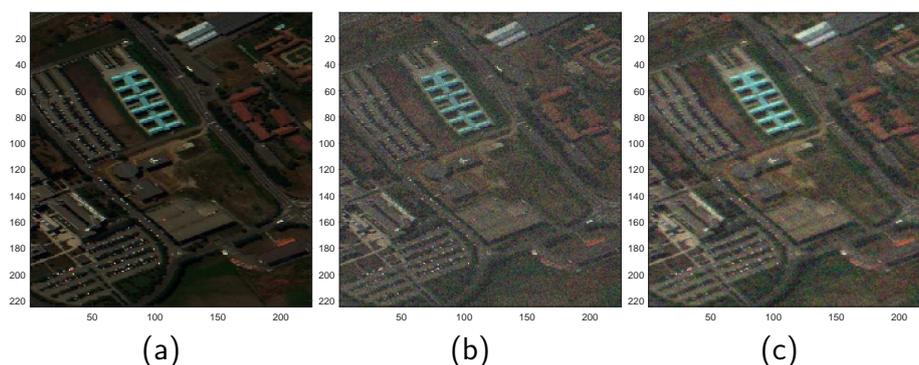


Figure 6.4 – PaviaU $256 \times 256 \times 103$: (a) non bruitée, (b) bruité 10 dB, et (c) image de référence

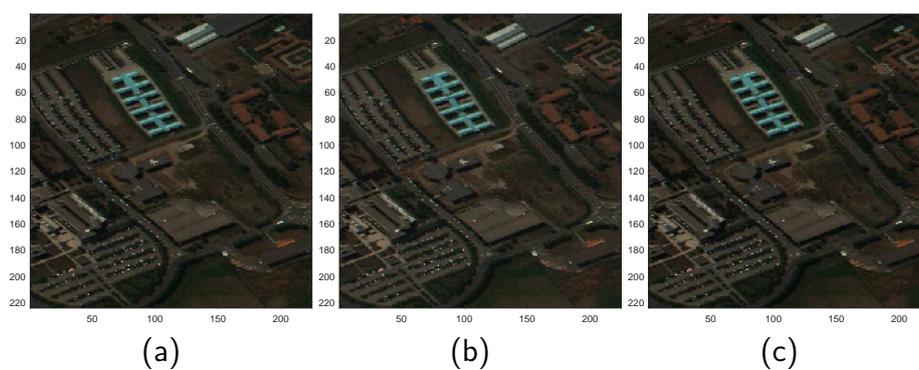


Figure 6.5 – PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Images débruitées obtenue avec (a) amixedGWO, (b) PSO, (c) GWO

Les Tables 6.2, 6.3 et 6.4 présentent respectivement les valeurs de SNR de sortie, les valeurs des erreurs de reconstruction et les meilleures valeurs obtenues pour chaque valeur de SNR_{in} . Le rang général du amixedGWO était 1 sur tous ces points, bien que la valeur de SNR de sortie soit plus petite pour au moins une méthode comparée. Cela signifie que, dans l'ensemble, bien que le amixedGWO ne possède pas forcément la meilleure performance en terme de débruitage, il possède un bon comportement en terme d'exploitation, ce qui explique les valeurs d'erreur de reconstruction, qui étaient les plus petites pour tous les cas de figures exceptés $SNR_{in} = 0dB$ (voir Table 6.3). La Table montre que les meilleures valeurs ont été obtenues par le amixedGWO excepté pour un SNR d'entrée de 5 et 15 dB. Dans ces cas, le amixedGWO possède un spectre débruité qui était le plus proche du spectre du modèle, mais au détriment du premier terme du critère de l'Eq. (6.18).

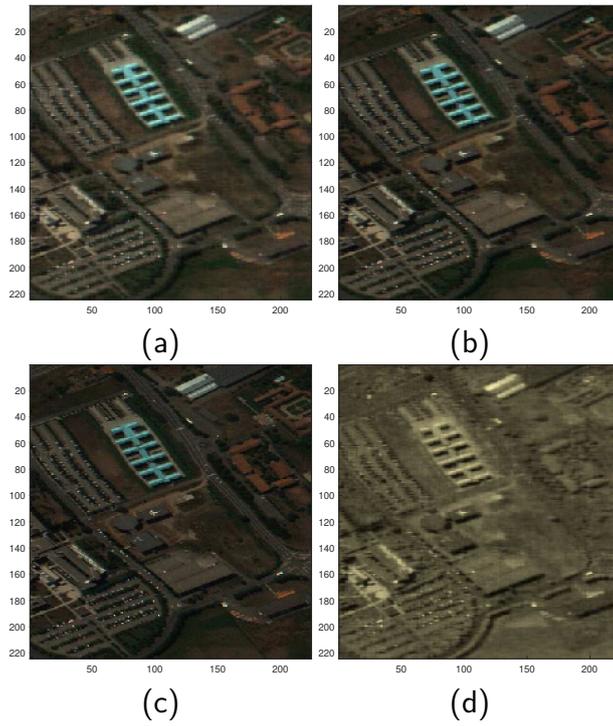


Figure 6.6 – PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Images débruitées obtenue avec (a) ABC, (b) TSA, (c) GA, (d) SA

SNR_{in}		Ref.	amixedGWO	PSO	GWO	ABC	TSA	GA	SA
0 dB		3.99	9.333	7.659	7.745	5.560	8.429	8.45	6.42
	Rank	8	1	4	5	6	3	2	7
5 dB		8.79	12.180	11.477	13.258	7.878	11.893	7.97	8.34
	Rank	5	2	4	1	7	3	8	6
10 dB		13.24	17.777	14.159	17.108	7.719	15.310	8.88	2.49
	Rank	5	1	4	2	7	3	6	8
15 dB		16.61	17.804	18.587	19.733	13.388	15.815	15.22	14.43
	Rank	4	3	2	1	8	5	6	7
20 dB		18.26	22.664	20.869	22.653	17.417	18.504	15.37	13.21
	Rank	5	1	3	2	6	4	7	8
	Avg. Rank	5.4	1.6	3.4	2.2	6.8	3.6	5.8	7.2
	Overall Rank	5	1	3	2	7	4	6	8

Table 6.2 – Résultats de débruitage SNR_{out} pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence \mathcal{X}_1

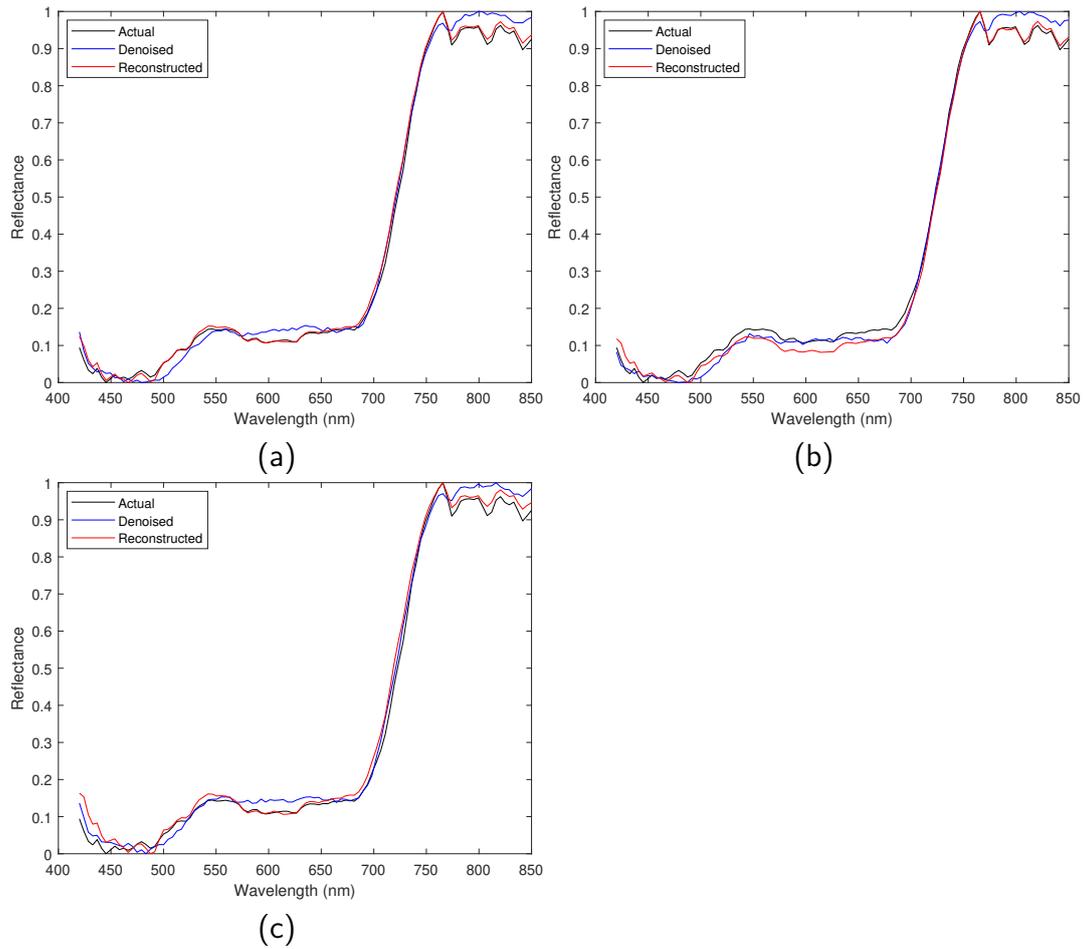


Figure 6.7 – PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Spectres réel, débruité, et reconstruit obtenus avec : (a) amixedGWO, (b) PSO, (c) GWO

SNR_{in}		amixedGWO	PSO	GWO	ABC	TSA	GA	SA
0 dB		$2.81e-03$	$4.44e-03$	$3.51e-03$	$5.30e-03$	$2.80e-03$	$4.00e-03$	$2.53e-02$
	Rank	2	5	3	6	1	4	7
5 dB		$2.34e-03$	$4.41e-03$	$3.41e-03$	$5.45e-03$	$3.12e-03$	$5.63e-03$	$5.59e-03$
	Rank	1	4	3	5	2	7	6
10 dB		$2.47e-03$	$3.12e-03$	$3.02e-03$	$3.68e-03$	$2.69e-03$	$2.79e-03$	$5.17e-03$
	Rank	1	5	4	6	2	3	7
15 dB		$1.89e-03$	$2.82e-03$	$3.13e-03$	$4.40e-03$	$2.66e-03$	$2.83e-03$	$5.63e-03$
	Rank	1	3	5	6	2	3	7
20 dB		$1.92e-03$	$2.82e-03$	$2.09e-03$	$2.75e-03$	$2.59e-03$	$4.26e-03$	$4.28e-03$
	Rank	1	5	2	4	3	6	7
	Avg. Rank	1.2	4.4	3.4	5.4	2	4.6	6.8
	Overall Rank	1	4	3	6	2	5	7

Table 6.3 – Résultats d'erreur de reconstruction de spectre RE pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence \mathcal{X}_1

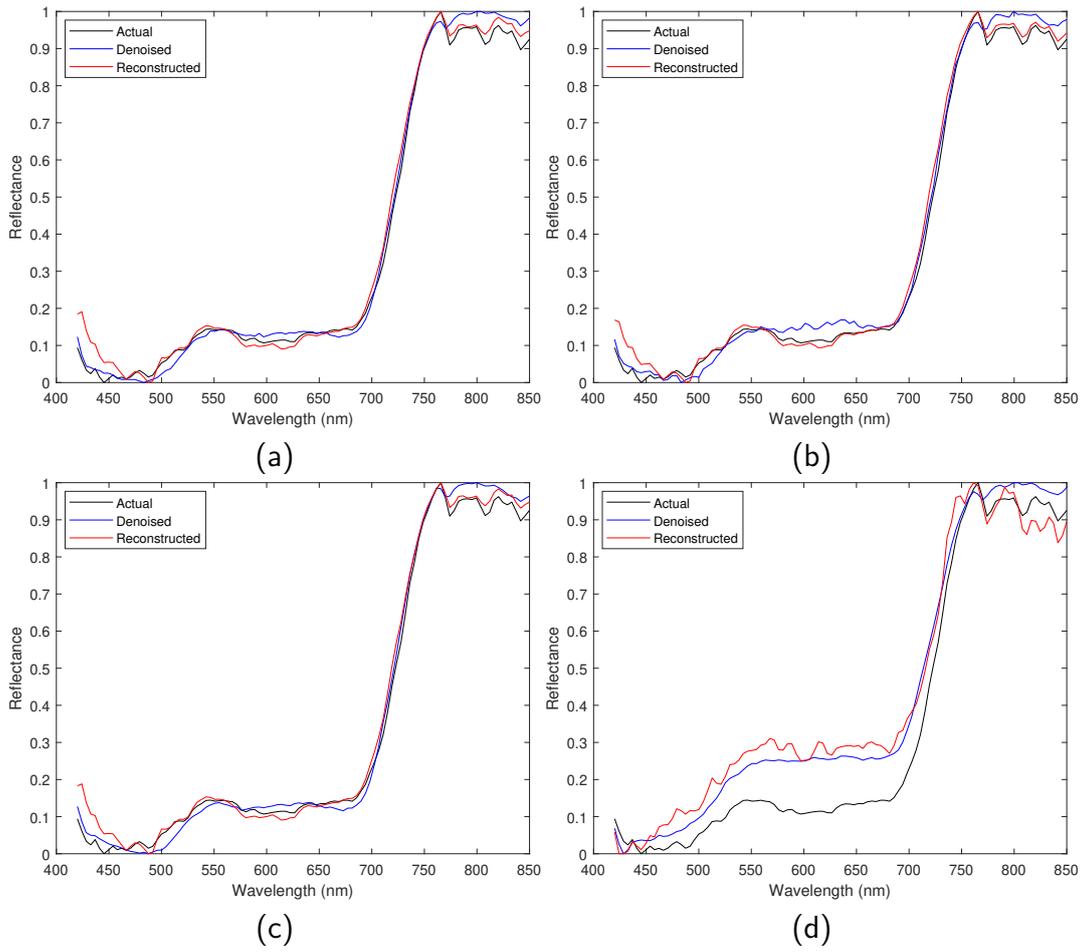


Figure 6.8 – PaviaU $256 \times 256 \times 103$. Spectres réel, débruité, et reconstruit obtenus avec : (a) ABC, (b) TSA, (c) GA, (d) SA

SNR_{in}		amixedGWO	PSO	GWO	ABC	TSA	GA	SA
0 dB		2.094e-03	2.894e-03	2.699e-03	2.264e-03	2.433e-03	6.14e-03	1.74e-02
	Rank	1	5	4	2	3	6	7
5 dB		1.372e-03	1.556e-03	1.166e-03	3.540e-03	1.653e-03	3.81e-03	4.54e-03
	Rank	2	3	1	5	4	6	7
10 dB		6.642e-04	1.044e-03	7.137e-04	2.046e-03	7.620e-04	2.26e-03	7.88e-03
	Rank	1	4	2	5	3	6	7
15 dB		5.032e-04	4.641e-04	5.538e-04	9.461e-04	5.480e-04	1.08e-03	1.48e-03
	Rank	2	1	4	5	3	6	7
20 dB		2.929e-04	3.418e-04	2.931e-04	4.792e-04	3.919e-04	7.71e-04	1.90e-03
	Rank	1	3	2	5	4	6	7
	Avg. Rank	1.4	3.2	2.6	4.4	3.4	6	7
	Overall Rank	1	3	2	5	4	6	7

Table 6.4 – Résultats de valeur de critère finale pour diverses valeurs de SNR_{in} en dB, et Fourier Wiener comme référence \mathcal{X}_1

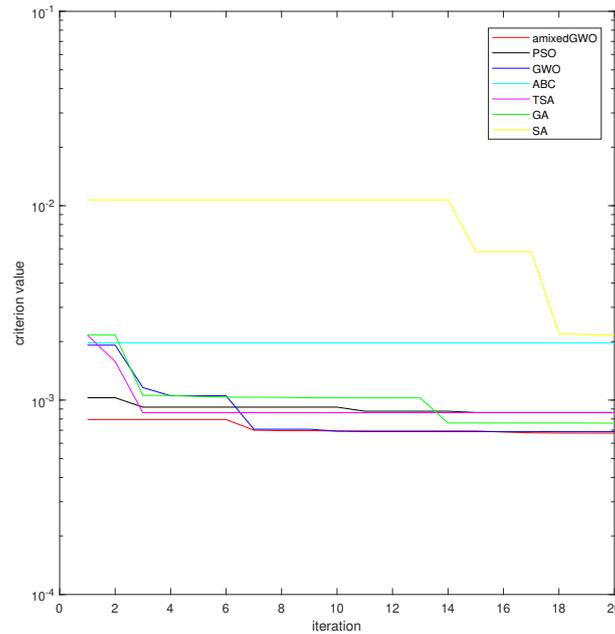


Figure 6.9 – Courbes de convergence moyennes avec $SNR_{in} = 10$ dB et une référence Fourier Wiener \mathcal{X}_1

6.3.3 Débruitage et démélange d'images multispectrales : bilan

Les performances du amixedGWO ont été testées sur une application réelle : le débruitage et démélange simultané d'images multi-spectrales. Le but de cette application était de trouver le meilleur équilibre entre la qualité du débruitage et la qualité du démélange de spectres. Dans cette application, certains paramètres étaient discrets, ici les valeurs de rang et le type du modèle de mélange, tandis que d'autres étaient des valeurs continues, ici les coefficients de mélange. La méthode proposée a été comparée aux méthodes de l'état-de-l'art PSO, GWO, ABC, TSA, GA et SA sur un cas réaliste. Le amixedGWO est parvenu à trouver les valeurs de rang attendues tout en obtenant l'erreur de reconstruction la plus faible. Cependant, une des limites de la stratégie proposée repose sur le choix du tenseur de référence : la capacité de convergence du amixedGWO était bonne, mais le critère était minimisé en fonction d'une référence qui est faillible. En effet, il est impossible de calculer une fonction à minimiser sans image de référence.

6.4 Algorithme GWO mixte : bilan et évolutions futures

Dans ce Chapitre 6, une variante de l'algorithme du GWO est présentée en détail. Cette méthode a été développée au cours de la thèse de Benoit Martin dans le but de pouvoir résoudre des problèmes entièrement continus, des problèmes entièrement discrets et des problèmes mixtes. Cette nouvelle version du GWO, baptisée *mixedGWO*, a été comparée statistiquement à d'autres versions de l'algorithme du GWO (GWO, *mGWO* et *MODGWO*) sur des problèmes entièrement continus et des problèmes entièrement discrets. Le *mixedGWO* a également été comparé au PSO, au TSA et au GA sur les fonctions de référence CEC2014. Cependant, vu qu'aucune autre méthode de ce genre n'existe dans l'état-de-l'art, le *mixedGWO* n'a pas pu être comparé à d'autres méthodes sur des fonctions de référence mixtes, mais les résultats obtenus sur ces fonctions étaient satisfaisants en soi. De par les résultats obtenus sur ces fonctions de référence et en comparaison à l'état-de-l'art, le *mixedGWO* proposé semble adapté aux applications considérées pendant la thèse de Benoit Martin, dont le débruitage et démélange simultané d'images multi-spectrales présenté dans ce manuscrit.

À propos des évolutions futures des méthodes *mixedGWO* et *amixedGWO*, il peut être intéressant d'étudier les performances des différentes versions de GWO si le nombre de paramètres à estimer change constamment, et, dans le cas de la version discrète du GWO, si le nombre d'éléments dans l'espace de recherche évolue. Un espace de recherche adaptatif pourrait être la solution. De plus, il semble intéressant d'étudier plus en détails les performances du *amixedGWO* proposé sur d'autres applications, et d'en créer une version multi-objectifs.

Enfin, à propos de l'optimisation bio-inspirée pour problèmes mixtes de manière globale, il pourrait être intéressant de créer une version discrète de certaines méthodes comparatives telles que le ABC ou le TSA. Cette version ne se limiterait pas aux problèmes binaires et serait inspirée du formalisme que nous proposons avec notre *mixedGWO*. Cependant, bien qu'elles soient très performantes, leur charge de calcul élevée risque d'être handicapant.

7 Débruitage de données multidimensionnelles par le filtrage tensoriel dans le domaine des ondelettes

Dans ce chapitre, je présente une introduction au filtrage tensoriel en section 7.1. Je mets en avant l'intérêt de disposer d'une méthode automatique d'estimation de valeurs de 'rang' tensoriel. En section 7.2 je présente la méthode développée pour estimer ces valeurs de rangs lorsque le filtrage est introduit dans la décomposition en paquets d'ondelettes. Notre contribution a consisté en l'adaptation de la méthode méta-heuristique PSO (particle swarm optimisation). Enfin en section 7.3 je présente quelques résultats d'application : un problème de débruitage d'images multispectrales en fluorescence soumis par l'IRSTEA à Montpellier, et un problème de débruitage de données RX multispectrales proposé par un collègue du CPPM à Marseille. Ces travaux ont donné lieu à la publication de l'article en revue suivant : [173]. Les méthodes présentées dans ce chapitre font suite à l'expérience que j'ai acquise dans le domaine du traitement du signal tensoriel en fin de thèse [133] et en début de Post-Doctorat [118]. Ces travaux ont également donné lieu à la publication des articles en conférence suivants : [90], [102], [114], [171], [175].

7.1 Introduction au filtrage tensoriel

7.1.1 Les données tensorielles

Les données tensorielles étendent le concept classique de vecteur de données. La mesure d'un signal multidimensionnel \mathcal{X} par des capteurs, éventuellement multi-modaux ou 'multi-composantes', auquel s'ajoute un bruit \mathcal{N} , résulte en un tenseur de données \mathcal{R} tel que :

$$\mathcal{R} = \mathcal{X} + \mathcal{N}. \quad (7.1)$$

\mathcal{R} , \mathcal{X} et \mathcal{N} sont des tenseurs d'ordre N de $\mathbb{R}^{I_1 \times \dots \times I_N}$. Les tenseurs \mathcal{N} et \mathcal{X} représentent les parties bruit et signal des données respectivement. Nous supposons que le bruit \mathcal{N} est indépendant du signal \mathcal{X} , et que le rang n -modal K_n est inférieur ou égal à la dimension n -modale I_n ($K_n \leq I_n$, pour tout $n = 1$ à N). Donc il est possible d'étendre l'approche classique par sous-espaces aux données tensorielles en supposant que, quel que soit le n -mode, l'espace vectoriel $E^{(n)}$ est la

somme directe de deux sous-espaces orthogonaux, $E_1^{(n)}$ et $E_2^{(n)}$, qui sont définis comme suit :

- $E_1^{(n)}$ est le sous-espace de dimension K_n , engendré par les K_n vecteurs singuliers associés aux K_n plus grandes valeurs singulières de la matrice \mathbf{X}_n ; $E_1^{(n)}$ est appelé le sous-espace signal [1, 126, 166, 167].
- $E_2^{(n)}$ est le sous-espace de dimension $I_n - K_n$, engendré par les $I_n - K_n$ vecteurs singuliers associés aux $I_n - K_n$ plus petites valeurs singulières de la matrice \mathbf{X}_n ; $E_2^{(n)}$ est appelé le sous-espace bruit [1, 126, 166, 167].

Une méthode pour estimer le tenseur signal \mathcal{X} à partir du tenseur de données \mathcal{R} est d'estimer $E_1^{(n)}$ dans chaque n -mode de \mathcal{R} .

7.1.2 Le filtrage tensoriel

Une vue d'ensemble des méthodes mathématiques dédiées aux données multicomposantes est présentée dans [133]. En résumé, la première méthode est une PCA multimodale appliquée par une approximation de rang- (K_1, \dots, K_N) au tenseur de données bruité, ou par une troncature de rang- (K_1, \dots, K_N) inférieur de sa HOSVD (higher order singular value decomposition ou décomposition en valeurs singulières d'ordre supérieur). Cette méthode est fondée sur des statistiques d'ordre deux et repose sur l'orthogonalité entre le sous-espace bruit et le sous-espace signal dans chaque n -mode. Nous avons détaillé la version multimodale du filtrage de Wiener. Le nom de cette méthode provient du critère minimisé, une erreur quadratique moyenne, entre le tenseur signal à retrouver et le tenseur estimé. Un algorithme ALS (Alternating Least Squares ou moindres carrés alternés) a été utilisé pour déterminer de façon optimale les filtres de Wiener n -modaux. Les performances de ce filtrage de Wiener multimodal et des résultats comparatifs avec la PCA multimodale ont été présentés dans le cas de la réduction de bruit blanc additif dans des images couleur et dans des signaux sismiques multicomposante. Ces méthodes par sous-espace reposent sur la connaissance *a priori* des valeurs des rangs n -modaux. ces valeurs peuvent être estimées par les critères statistiques AIC (Akaike Information Criterion) ou MDL (Minimum Description Length) [161], pour chaque mode indépendamment des autres. Une partie du travail présenté dans ce chapitre a consisté à adapter des méthodes d'optimisation et donc à remplacer ces critères statistiques, pour estimer conjointement les valeurs de rang.

7.2 Estimation automatisée de paramètres dans le domaine des ondelettes pour le débruitage de données tensorielles

7.2.1 Introduction

L'estimation correcte des valeurs de 'rang' ou de dimension du sous-espace signal dans le cadre du filtrage tensoriel de données multidimensionnelles est un verrou qui restait à lever en 2015, au début de la thèse d'Abir Zidi. Cette estimation automatique s'était avérée nécessaire depuis la thèse de Tao Lin [89, 90], lorsque le filtrage de Wiener multimodal a été appliqué aux coefficients de la décomposition en paquets d'ondelettes. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé un critère à minimiser, et adapté la méthode d'optimisation globale méta-heuristique PSO. En effet, à l'époque où j'ai commencé à publier ces travaux [114], en 2015, c'était la méthode d'optimisation bio-inspirée la plus connue. La méthode du Loup Gris citée précédemment dans ce manuscrit (Cf Chap. 6), décrite en mars 2014 [129], n'était pas encore largement diffusée.

7.2.2 Le verrou : l'estimation des valeurs de rangs dans un contexte multidimensionnel

Un signal multidimensionnel bruité est considéré : un 'tenseur' \mathcal{X} dégradé par un bruit blanc additif multidimensionnel, Gaussien et de moyenne nulle \mathcal{N} [133]. Par exemple, le modèle additif est valable pour les images hyperspectrales [146, 141]. En ce qui concerne l'hypothèse d'un bruit blanc Gaussien, elle est également généralement admise pour des images multidimensionnelles [133]. Ainsi, une image hyperspectrale ou hyperspectral image (HSI) peut être modélisée par un tenseur exprimé comme suit : $\mathcal{R} = \mathcal{X} + \mathcal{N}$. Les tenseurs \mathcal{R} , \mathcal{X} , et \mathcal{N} sont de taille $l_1 \times l_2 \times l_3$. Pour chaque bande spectrale indiquée par $i = 1, \dots, l_3$, le bruit $\mathcal{N}(:, :, i)$ est supposé être additif, Gaussien et de moyenne nulle. Notre objectif est de débruiter le tenseur \mathcal{R} avec une méthode tensorielle par sous-espace. Une telle méthode fournit un signal estimé noté $\hat{\mathcal{X}}$. Cette estimée dépend de ce qu'on appelle les rangs K_1, K_2, K_3 , qui doivent donc être estimés.

7.2.3 Filtrage de Wiener multimodal dans le domaine des ondelettes

Dans [89], le filtre de Wiener multimodal a été inséré dans le domaine des ondelettes pour débruiter des images multidimensionnelles tout en préservant les détails. Sous forme tensorielle, on peut étendre la décomposition en paquets d'ondelettes 2-D ou wavelet packet transform (WPT) en une décomposition en

paquets d'ondelettes multidimensionnelle ou multidimensional wavelet packet transform (MWPT) :

$$\mathcal{C}_1^{\mathcal{R}} = \mathcal{R} \times_1 \mathbf{W}_1 \times_2 \mathbf{W}_2 \times_3 \mathbf{W}_3, \quad (7.2)$$

Dans l'Eq. (7.2) $\mathcal{C}_1^{\mathcal{R}}$ est le 'tenseur coefficient' (donc une donnée multidimensionnelle) de la MWPT pour les niveaux de décomposition donnés dans le vecteur $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3]^T$; pour toute valeur de n de 1 à 3, $\mathbf{W}_n \in \mathbb{R}^{l_n \times l_n}$ dénote les matrices de la WPT, et \times_n dénote le n-mode produit [89]. Cette notation est quelque peu abusive car plutôt qu'un n-mode produit, c'est une convolution qui est au coeur du procédé, mais la convolution est bien effectuée sur les dépliantes de la donnée à traiter, successivement. Pour sélectionner une 'composante fréquentielle' d'intérêt parmi les coefficients, un indice de 'fréquence' est défini pour le mode 1, le mode 2, et le mode 3. Un ensemble de 3 indices forme le vecteur $\mathbf{m} = [m_1, m_2, m_3]^T$. Pour n allant de 1 à 3 les valeurs d'indice m_n sont telles que $0 \leq m_n \leq 2^{l_n} - 1$. Le coefficient extrait de $\mathcal{C}_1^{\mathcal{R}}$ contenant les composantes de fréquence pour un vecteur d'indice \mathbf{m} donné est noté $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$. On peut remarquer que la taille de chaque coefficient $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$ est $\frac{l_n}{2^{m_n}}$ selon chaque mode n , quel que soit le vecteur d'indices \mathbf{m} [89].

Le principe de la décomposition en paquets d'ondelettes multidimensionnelle associée au filtre de Wiener multidimensionnel (MWPT-MWF) proposé dans [89] est d'appliquer le filtre de Wiener multidimensionnel de façon successive sur chaque tenseur coefficient $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$.

Selon les mêmes notations que pour le tenseur bruité \mathcal{R} , soient $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}$ et $\widehat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}$ les tenseurs coefficients des tenseurs à estimer \mathcal{X} et estimé $\widehat{\mathcal{X}}$.

D'après le théorème de Parseval, minimiser l'erreur quadratique moyenne (mean squared error MSE) entre \mathcal{X} et son estimée $\widehat{\mathcal{X}}$ est équivalent à minimiser l'erreur quadratique moyenne entre $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}$ et $\widehat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}$ pour chaque vecteur d'indices \mathbf{m} :

$$\|\mathcal{X} - \widehat{\mathcal{X}}\|^2 = \|\mathcal{C}_1^{\mathcal{X}} - \widehat{\mathcal{C}}_1^{\mathcal{X}}\|^2 = \sum_{\mathbf{m}} \|\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}} - \widehat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}\|^2 \quad (7.3)$$

Pour minimiser l'expression $\|\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}} - \widehat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}\|^2$ pour tous les vecteurs \mathbf{m} , le filtre de Wiener multidimensionnel est appliqué. Cela requiert, pour tout vecteur \mathbf{m} , la connaissance *a priori* de trois valeurs de rang.

7.2.4 Critère proposé pour l'estimation optimale des valeurs de rang

Dans les travaux de Tao Lin [89], le critère Akaike (Akaike information criterion AIC) est utilisé pour estimer des valeurs de rang. Ce critère AIC donne en effet de bons résultats dans le domaine du traitement d'antenne pour estimer le nombre de sources [161]. Mais dans le contexte du traitement d'antenne, le

nombre de réalisations de signal à disposition pour calculer des statistiques est élevé, et le nombre de sources est faible. C'est la situation qui permet au critère AIC de donner les meilleurs résultats. Lorsque le nombre de réalisations diminue et que le nombre de sources augmente, les résultats obtenus sont moins fiables. C'est le cas dans le cadre du traitement des images hyperspectrales, qui de plus peuvent être très bruitées. Il a été montré dans [146] qu'il n'existe pas de domination nette entre un ensemble de valeurs propres appartenant au sous-espace 'signal' et un ensemble de valeurs propres appartenant au sous-espace 'bruit'. Dans ce cadre, AIC a tendance à surestimer les valeurs de rang. J'ai donc proposé de minimiser un critère des moindres carrés [114]. Nous recherchons en effet un critère qui tient compte de la nature du bruit (qui est supposé Gaussien). Des méthodes de restauration par maximisation de la vraisemblance ont été développées pour du bruit de Poisson, ou du bruit Gaussien [61]. Dans le cas d'un bruit Gaussien, cela conduit à la minimisation d'un critère des moindres carrés [85]. Cela a conduit notamment au filtre de Wiener pour débruiter des images de façon générale [53], et au filtre de Wiener multidimensionnel pour débruiter des données multidimensionnelles [133]. Or le filtre de Wiener multidimensionnel est au coeur des algorithmes présentés ici. Pour toutes ces raisons, parmi plusieurs critères que nous pourrions minimiser (avec différents types de norme, voire des M-estimateurs [95]) nous avons choisi un critère des moindres carrés (least square error LSE) pour estimer les valeurs de rang :

$$J_m(K_1, K_2, K_3) = \|\mathcal{C}_{1,m}^{\mathcal{X}_1} - \widehat{\mathcal{C}}_{1,m}^{\mathcal{X}}(K_1, K_2, K_3)\|^2 \quad (7.4)$$

où $\|\cdot\|$ est la norme de Frobenius, \mathcal{X}_1 une estimée grossière du tenseur à estimer \mathcal{X} , et $\widehat{\mathcal{C}}_{1,m}^{\mathcal{X}}$ est un coefficient de l'estimée finale $\widehat{\mathcal{X}}$. $\widehat{\mathcal{C}}_{1,m}^{\mathcal{X}}$ dépend des valeurs de rang (K_1, K_2, K_3) .

Le critère $J_m(K_1, K_2, K_3)$ est une fonction non-linéaire des paramètres à estimer K_1, K_2, K_3 , d'où la nécessité d'adapter une méthode d'optimisation globale. Nous avons opté pour la méthode 'optimisation par essaim de particules' soit 'Particle Swarm Optimization' (PSO), méthode d'optimisation méta-heuristique bio-inspirée phare à cette époque (2015).

7.2.5 Filtre de Wiener non supervisé dans le domaine des ondelettes

Nous montrons ici comment l'on peut obtenir un algorithme MWPT-MWF non supervisé, c'est-à-dire qui ne nécessite pas que l'on donne 'à la main' les valeurs de rang pour le filtrage de Wiener. Cette méthode est d'un grand intérêt car ces valeurs sont nombreuses dès que le nombre de niveaux de décomposition est supérieur à 1. Nous proposons aussi une méthode pour estimer le nombre optimal de niveaux de décomposition dans chaque mode.

7.2.5.1 Estimation automatique de valeurs multiples de rang

D'évidence, même en nous restreignant à des données multidimensionnelles qui sont des tenseurs d'ordre 3 comme les images couleur ou les images hyperspectrales, il est nécessaire d'automatiser l'estimation des valeurs de rang, et ce avec une méthode d'optimisation globale. En effet, 3 valeurs de rang doivent alors être estimées pour chaque coefficient, et il existe 2^{l_n} coefficients à calculer selon chaque mode n , avec $n = 1, 2, 3$. Pour tout mode n , on décompose les coefficients du mode n selon les autres modes, et le nombre total de coefficients est donc $\prod_{n=1}^3 2^{l_n}$. Le nombre total de valeurs de rang est donc $3 \prod_{n=1}^3 2^{l_n}$. Ce nombre peut être élevé (par exemple 48 pour $\mathbf{l} = [2, 2, 0]^T$). Ainsi, on voit l'intérêt d'estimer les valeurs de rang de façon automatique.

Nous souhaitons minimiser tous les éléments de la somme de l'Eq. (7.3). Pour cela, nous proposons l'algorithme 5, 'transformée en paquets d'ondelettes multidimensionnelle et filtre de Wiener multidimensionnel avec estimation de rangs', soit *multidimensional wavelet packet transform and multiway Wiener filtering with rank estimation* (MWPT-MWF-RE).

Dans l'algorithme 5, $\mathbf{H}_{1,m}$, $\mathbf{H}_{2,m}$ et $\mathbf{H}_{3,m}$ dénotent les filtres n-modaux MWF, qui dépendent des valeurs de rang K_1, K_2, K_3 [133] : $\mathcal{C}_{l,m}^{\mathcal{R}}$ dénote la décomposition de \mathcal{R} . On notera que, pour diminuer la charge de calcul requise, on effectue un sous-échantillonnage des tenseurs à traiter lors de l'estimation des valeurs de rang (Cf étape 3a). On pourrait aussi adapter des versions rapides utilisant l'algorithme du point fixe [118] mais elles ne sont efficaces que lorsque les valeurs de rang sont faibles, donc quand le niveau de bruit est très élevé. Cela peut ne pas être le cas dans les image hyperspectrales que l'on veut traiter, et dans lesquelles nous sommes censés pouvoir préserver des détails *via* un procédé de transformée en ondelettes.

Algorithm 5 MWPT-MWF-RE

Entrée : tenseur bruité \mathcal{R} , estimée grossière \mathcal{X}_1 de \mathcal{R} obtenue par MWF avec 3 valeurs de rang fixées de façon supervisée -à la main-.

1. Calculer la décomposition en ondelettes du tenseur bruité \mathcal{R} et de l'estimée grossière \mathcal{X}_1 : $\mathcal{C}_1^{\mathcal{R}} = \mathcal{R} \times_1 \mathbf{W}_1 \times_2 \mathbf{W}_2 \times_3 \mathbf{W}_3$, $\mathcal{C}_1^{\mathcal{X}_1} = \mathcal{X}_1 \times_1 \mathbf{W}_1 \times_2 \mathbf{W}_2 \times_3 \mathbf{W}_3$.
2. Extraire les coefficients [89] :
 $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}} = \mathcal{C}_1^{\mathcal{R}} \times_1 \mathbf{E}_{m_1} \times_2 \mathbf{E}_{m_2} \times_3 \mathbf{E}_{m_3}$, $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_1} = \mathcal{C}_1^{\mathcal{X}_1} \times_1 \mathbf{E}_{m_1} \times_2 \mathbf{E}_{m_2} \times_3 \mathbf{E}_{m_3}$.
3. Effectuer l'estimation des valeurs de rang et le débruitage de chaque coefficient $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$ associé au vecteur \mathbf{m} :

- a) Sous-échantillonner $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$ et $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_1}$ par des facteurs S_1 , S_2 , et S_3 selon les premier, second, et troisième mode pour obtenir une version de petite taille $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}_S}$ et $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}}$. On note que $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}}$ est une estimée grossière de $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}_S}$.
- b) Estimer les valeurs de rang optimales $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3$ avec une méthode d'optimisation globale, en minimisant le critère suivant :

$$J_{\mathbf{m}}(K_1, K_2, K_3) = \|\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}} - \hat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}}(K_1, K_2, K_3)\|^2$$

Dans l'équation ci-dessus, $\hat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}}$ est obtenu à partir de $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}_S}$ avec le filtre MWF :
 $\hat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}_{1S}} = \mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}_S} \times_1 \mathbf{H}_{1,\mathbf{m}} \times_2 \mathbf{H}_{2,\mathbf{m}} \times_3 \mathbf{H}_{3,\mathbf{m}}$, où $\mathbf{H}_{1,\mathbf{m}}$, $\mathbf{H}_{2,\mathbf{m}}$ et $\mathbf{H}_{3,\mathbf{m}}$ dépendent de K_1, K_2 , et K_3 respectivement.

- c) Multiplier les valeurs obtenues à l'étape (3b) par S_1 , S_2 , et S_3 respectivement :
 $\hat{K}_1 = S_1 K_1$, $\hat{K}_2 = S_2 K_2$, et $\hat{K}_3 = S_3 K_3$.
 - d) Appliquer le filtre MWF à chaque tenseur coefficient $\mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}}$, avec les valeurs de rang optimales :
 $\hat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}} = \mathcal{C}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{R}} \times_1 \mathbf{H}_{1,\mathbf{m}} \times_2 \mathbf{H}_{2,\mathbf{m}} \times_3 \mathbf{H}_{3,\mathbf{m}}$ où $\mathbf{H}_{1,\mathbf{m}}$, $\mathbf{H}_{2,\mathbf{m}}$ et $\mathbf{H}_{3,\mathbf{m}}$ dépendent de \hat{K}_1 , \hat{K}_2 , et \hat{K}_3 respectivement.
4. Concaténer tous les coefficients $\hat{\mathcal{C}}_{1,\mathbf{m}}^{\mathcal{X}}$ pour obtenir la décomposition en paquets d'ondelettes $\hat{\mathcal{C}}_1^{\mathcal{X}}$ [89].
 5. Obtenir l'estimer finale par l'inversion de la transformée en paquets d'ondelettes multidimensionnelle :
 $\hat{\mathcal{X}} = \hat{\mathcal{C}}_1^{\mathcal{X}} \times_1 \mathbf{W}_1^T \times_2 \mathbf{W}_2^T \times_3 \mathbf{W}_3^T$.

Sortie : tenseur débruité $\hat{\mathcal{X}}$.

7.2.5.2 Estimation du nombre de niveaux de décomposition

A l'étape 1 de l'algorithme 5, le nombre de niveaux pour la décomposition en ondelettes, contenu dans le vecteur $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3]^T$, est requis, et doit donc être estimé. Dans [89], ces valeurs sont choisies de façon empirique. Nous proposons un algorithme pour les estimer. Pour éviter d'avoir trop de valeurs candidates, posons $l_3 = 0$. On a effet constaté qu'il n'est jamais intéressant d'effectuer une décomposition selon le troisième mode. Posons aussi $l_1 = l_2 \leq 3$, ce qui constitue l'ensemble des situations dignes d'intérêt selon un constat empirique [89]. Ainsi, les vecteurs candidats sont \mathbf{l} égal à $[1, 1, 0]^T$, $[2, 2, 0]^T$, et $[3, 3, 0]^T$. Pour faire notre choix entre ces trois possibilités, nous appliquons l'algorithme 6 ci-dessous. Dans cet algorithme, à l'étape 1, un sous-échantillonnage est effectué pour accélérer le processus. A l'étape 2a, nous notons que, pour tout mode $n = 1, 2, 3$, la valeur de rang est $K_n = \frac{l_n}{s_n 2^{1+n}}$. Elle est ici fixée à la moitié de la taille du coefficient traité. Ce choix est arbitraire, mais nous ne souhaitons pas ici débruiter la donnée de façon optimale, simplement faire un choix pour \mathbf{l} .

Algorithm 6 Estimation du nombre de niveaux de décomposition

Entrée : tenseur bruité \mathcal{R} de taille $l_1 \times l_2 \times l_3$, estimée grossière \mathcal{X}_1 de \mathcal{R} obtenue par MWF avec des valeurs de rang $K_1 = \frac{l_1}{2}$, $K_2 = \frac{l_2}{2}$, $K_3 = \frac{l_3}{2}$, ensemble de vecteurs candidats \mathbf{l} .

1. Sous-échantillonner \mathcal{R} et \mathcal{X}_1 de facteurs S_1, S_2 , et S_3 selon les modes 1, 2 et 3;
2. Pour chaque vecteur candidat $\mathbf{l} = [l_1, l_2, l_3]^T$:

a) Appliquer l'algorithme 5 avec des valeurs fixées de rang :

$$K_1 = \frac{l_1}{s_1 2^{1+l_1}}, K_2 = \frac{l_2}{s_2 2^{1+l_2}}, K_3 = \frac{l_3}{s_3 2^{1+l_3}}, \text{ soit la moitié de la taille des coefficients.}$$

b) Obtenir l'erreur entre l'estimée obtenue avec l'algorithme 5 à l'étape 2. (a) et la version sous-échantillonnée de \mathcal{X}_1 .

3. Sélectionner le vecteur \mathbf{l} pour lequel l'erreur est minimale.

Sortie : vecteur optimal \mathbf{l} au sens des moindres carrés.

Le tenseur de référence doit toujours être obtenu de façon supervisée, par le filtre MWF avec des rangs fixés à la main.

7.2.5.3 Algorithme itératif pour l'estimation du tenseur de référence

Dans l'Eq. (7.4), un tenseur de référence est requis, qui dans l'idéal devrait être le tenseur à retrouver lui-même. Comme nous n'en disposons pas bien entendu, nous proposons un algorithme itératif : une estimée grossière est d'abord fournie par MWF, puis la sortie de l'algorithme devient la nouvelle estimée grossière, et ainsi de suite : à l'itération $r > 1$ le tenseur de référence est $\hat{\mathcal{X}}_{r-1}$, le résultat de débruitage obtenu à l'itération $r - 1$. L'algorithme est stoppé quand l'estimée à r diffère suffisamment peu de l'estimée à $r - 1$ (d'un facteur δ).

Dans la Fig. 7.1, nous présentons l'algorithme associé à ce processus itératif. Cette version itérative est notée MM-itératif (MM signifiant MWPT-MWF). Une seule itération du MM-itératif équivaut à l'algorithme MM-PSO.

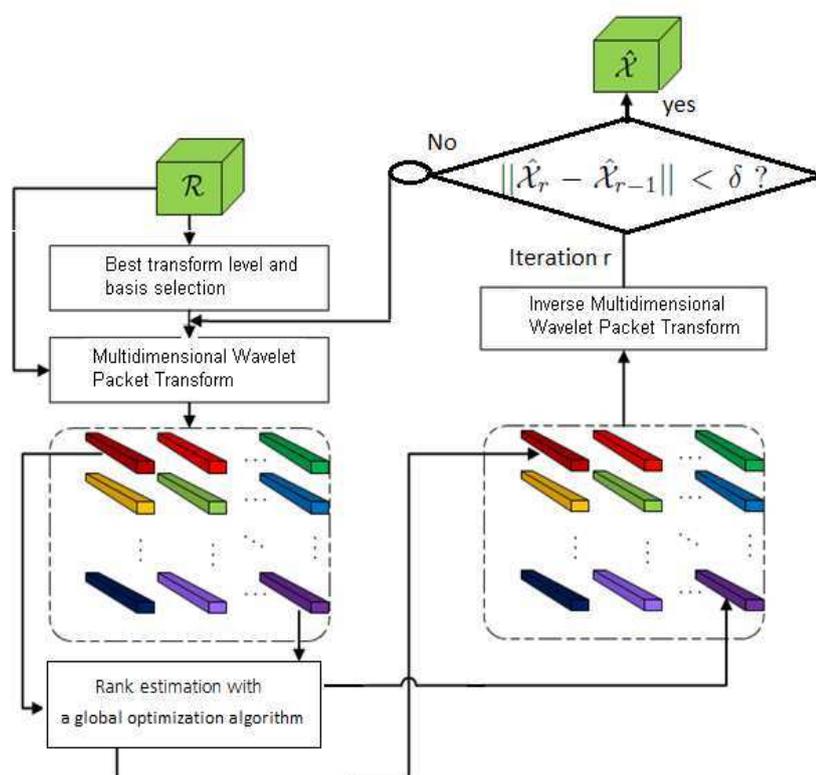


Figure 7.1 – Estimation de rang pour le filtre de Wiener multidimensionnel avec une méthode d'optimisation globale dans le domaine des ondelettes : processus itératif

7.3 Application au débruitage de données multispectrales en fluorescence et RX

7.3.1 Introduction

Les applications présentées ici résultent d'une collaboration avec Ryad Bendoula, Chargé de Recherche à l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) à Montpellier, et Yannick Boursier, Maître de Conférences à Luminy au Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM).

7.3.2 Imagerie de plantes en fluorescence

Les images en fluorescence sont connues pour être entachées de bruit : le phénomène imagé est de faible intensité, et le gain des capteurs est poussé au maximum, ce qui amplifie le bruit. Il est donc d'un certain intérêt, si l'on veut diminuer les temps d'acquisition, de pouvoir débruiter les données acquises. L'IRSTEA à Montpellier dispose d'un tel montage pour l'acquisition d'images hyperspectrales en fluorescence.

7.3.2.1 Système d'acquisition

La caméra hyperspectrale utilisée est une HySpex VNIR-1600 (Norsk Elektro Optikk, Norvège) qui acquiert 160 bandes spectrales entre 415 et 994 nm avec un pas de 3.7 nm. Une ligne de l'image est constituée de 1600 colonnes. Comme sur le schéma de la Fig. 7.2, la caméra est placée à 30 cm au-dessus de la scène. Comme illustré en Fig. 7.3, un faisceau de lumière violette est projeté sur une feuille d'arbre, pour générer un phénomène de fluorescence. Une lampe halogène et un monochromateur transmettent la lumière de longueur d'onde adéquate (400 nm), et la cible (la feuille) se déplace. L'image est acquise ligne par ligne.

7.3.2.2 Résultats : imagerie en fluorescence de feuille

Lorsqu'elle est éclairée par la source de lumière violette, la feuille émet un signal de faible énergie, dans un domaine de longueur d'onde compris entre 600 et 800 nm.

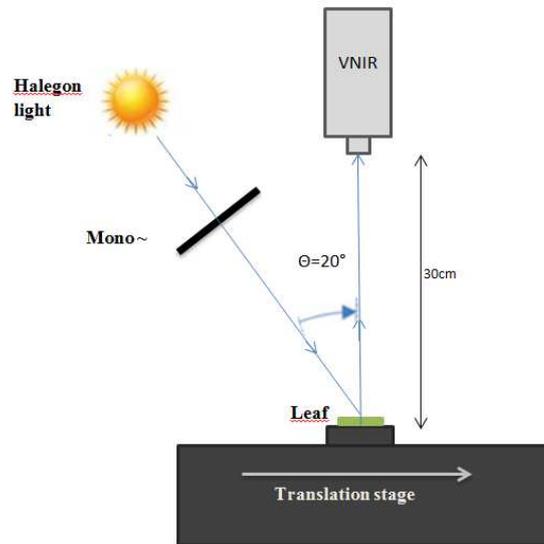


Figure 7.2 – Schéma Experimental

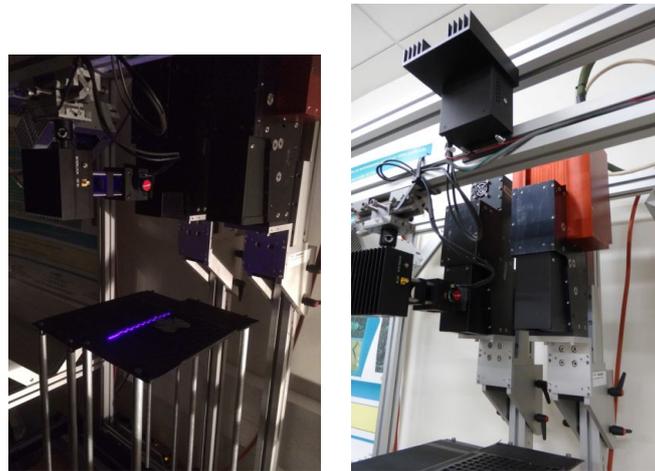


Figure 7.3 – Setup : induction et imagerie d'un phénomène de fluorescence de feuille d'arbre

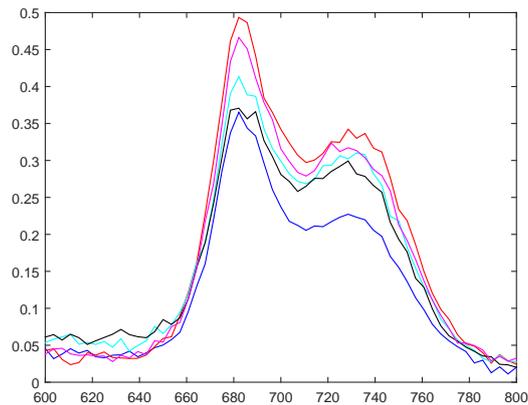


Figure 7.4 – Fluorescence induite sur une feuille d’arbre, domaine de longueur d’onde d’intérêt. En abscisse : longueur d’onde en nm. En ordonnée : réflectance (valeur relative).

Dès que le temps d’acquisition est faible, le bruit électronique augmente par rapport à la partie utile du signal, d’où l’intérêt de débruiter les images. La Fig. 7.5 montre l’image obtenue dans les meilleures conditions, avec une puissance consommée par la lampe qui est élevée, et un temps d’exposition lui aussi élevé, soit 50 ms. Nous affichons une sous-image résultant d’un sous-échantillonnage spatial et spectral, de taille $256 \times 256 \times 16$ en Fig. 7.5 a), et deux autres images de taille $128 \times 128 \times 16$ et $64 \times 64 \times 16$ en Fig. 7.5 b) et 7.5 c).

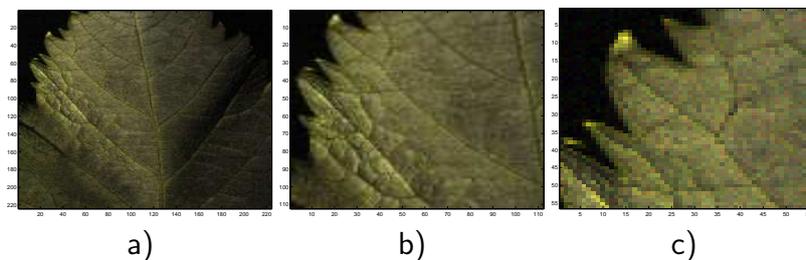


Figure 7.5 – Imagerie en fluorescence de feuille : a) grande image ; b) zoom 1 ; c) zoom 2.

Les Figs. 7.6, et 7.7 correspondent à différentes valeurs de temps d’exposition entre 50 ms et 250 ms, et de puissance lumineuse incidente, pour la même feuille. Plus la puissance consommée par la lampe est faible, plus le niveau de bruit est élevé.

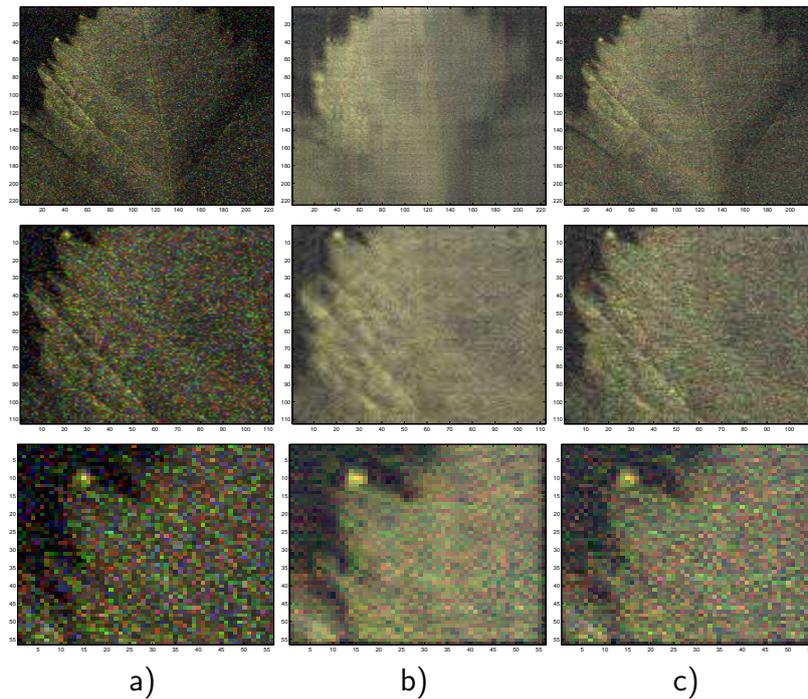


Figure 7.6 – Imagerie en fluorescence de feuille (0 dB) : a) acquisition bruitée; b) MM-PSO; c) MM-Iteratif.

Les images traitées contiennent 16 bandes entre 677 nm et 740 nm (dans le domaine d'émission de lumière fluorescente). Pour leur représentation, on a sélectionné les bandes à 677, 681, et 726 nm pour les canaux R, G, et B. Ces longueurs d'onde correspondent à des maxima d'émission (voir Fig. 7.4).

Pour évaluer les résultats de débruitage de façon quantitative, nous avons considéré les images en Fig. 7.5 comme étant non-bruitées. le rapport signal sur bruit (signal to noise ratio SNR) des images brutes en Figs. 7.6, et 7.7 est de 0.5, et 15.5 dB respectivement. MM-PSO conduit à 4.0, et 15.1 dB comme SNR de sortie. MM-iteratif conduit à 3.6, et 16.3 comme SNR de sortie. le temps de calcul pour une image de taille $256 \times 256 \times 16$ est de 13.8 sec. pour MM-PSO, et 33.6 sec. pour MM-Iteratif. Pour comparaison, acquérir une telle image avec un temps d'exposition de 50 ms prend plusieurs minutes.

On peut noter que les résultats obtenus par MM-PSO sont plus flous et moins bruités que lorsque MM-Iteratif est utilisé. En effet, le filtre MWF donne tout d'abord une estimée grossière floue et peu bruitée. Quand MM-PSO est utilisé, une image débruitée est obtenue par traitement dans le domaine des ondelettes. Les contours et les détails tels les nervures de la feuille sont donc mieux préservés que lorsque MWF est appliqué. Cette nouvelle référence utilisée dans MM-Iteratif conduit la méthode PSO à fournir des valeurs de rang K_1 , K_2 , K_3 élevées (plus élevées que lorsque MWF est utilisé pour obtenir la référence). C'est pourquoi le résultat donné par MM-Iteratif en définitive apparaît plus bruité mais moins flou

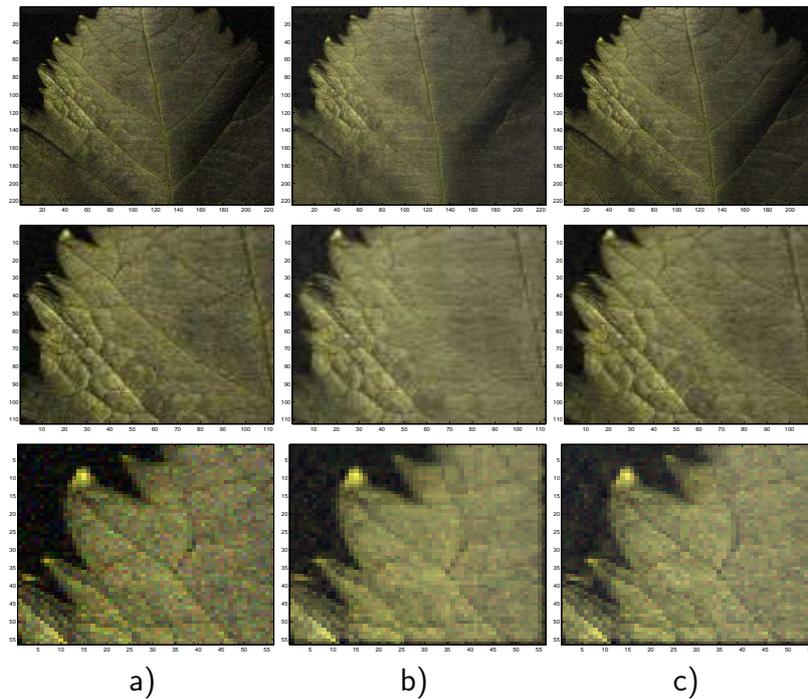


Figure 7.7 – Imagerie en fluorescence de feuille (15 dB) : a) acquisition bruitée ; b) MM-PSO ; c) MM-Iteratif.

que lorsque MM-PSO est appliqué. Finalement, l'objectif que nous souhaitons atteindre en travaillant dans le domaine des ondelettes est atteint dans le sens où les détails sont préservés, par exemple au niveau des nervures. Cependant, nous pouvons remarquer que les valeurs de SNR sont un peu décevantes par rapport à des simulations effectuées avec du bruit Gaussien généré artificiellement. Il est possible que le bruit présent naturellement dans ces images soit un bruit électronique de nature plutôt Poissonienne. Or le filtre de Wiener multidimensionnel maximise la vraisemblance à condition que le bruit soit Gaussien.

7.3.3 Tomographie par rayons X multispectraux

L'avènement d'une nouvelle technologie de détection des rayons X (les caméras à pixels hybrides) a permis la mise au point du démonstrateur PIXSCAN au CPPM, d'un micro-tomodensitomètre pour le petit animal et du démonstrateur ClearPET/XPAD, tomographe hybride PET/CT développé au CPPM conjointement avec l'EPFL (Lausanne, Suisse).

Des algorithmes de reconstruction itératifs tenant compte de la nature Poissonnienne du bruit à bas comptage, que les caméras à pixels hybrides permettent d'atteindre, ont été spécifiquement développés pour le PIXSCAN au CPPM mais le cadre théorique se limite à de la tomographie monochromatique classique. Or, les caméras à pixels hybrides sont utilisées pour compter les photons X au-dessus d'un seuil d'énergie donné, et fournissent ainsi un accès au spectre en énergie de l'objet imagé. Cette perspective ouvre la voie à la tomographie en RX polychromatiques. De telles images de tomographie en rayons X, à 3 bandes, nous ont été fournies. Nous avons testé nos algorithmes sur des versions artificiellement bruitées de ces images, et sur des versions contenant naturellement du bruit, dont on pense qu'il est Poissonnien. Nous considérons un ensemble de données composées de 8 vues, toutes de taille $256 \times 256 \times 3$.

7.3.3.1 Plan du prototype PIXSCAN

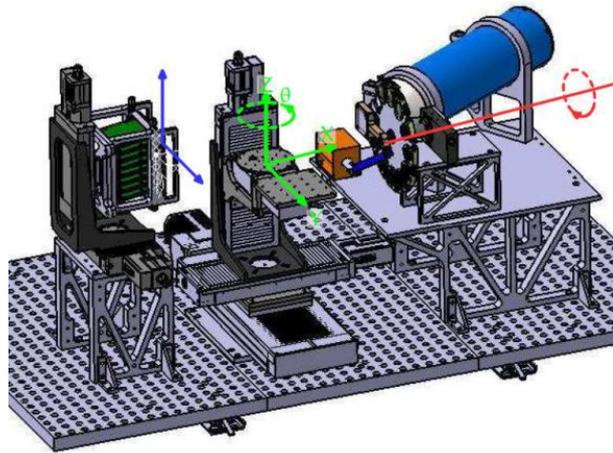


Figure 7.8 – Plan du prototype PIXSCAN

La Fig. 7.8 représente PIXSCAN. Au centre peut être placé l'objet à étudier. Yannick Boursier, du CPPM, sait aussi simuler des images. Dans les images qu'il nous a fournies, l'objet simulé est un cylindre de plastique troué sur sa hauteur de 6 inserts cylindriques dans lesquels on a injecté différentes solutions/constituants :

de l'iode, du nitrate d'argent, de l'os, des tissus mous. Yannick Boursier a simulé des images tomographiques pour 8 angles de vues différents, et dans 3 bandes spectrales pour chaque vue. Les vues sont toutes indépendantes. Nous avons traitée une vue.

7.3.3.2 Images résultat

Dans les résultats présentés ci-dessous, nous faisons varier les conditions de travail : soit nous bruitons artificiellement l'image, soit nous utilisons une image naturellement bruitée. A chaque fois, lorsque l'algorithme MM-PSO est utilisé, nous choisissons deux ensembles de valeurs pour les rangs du tenseur de référence \mathcal{X}_1 . Ces valeurs de rang sont données en pourcentage, traduisant le rapport du rang à la taille de l'image pour tout mode spatial, *i. e.* 20 % par exemple avec un rang spatial de 51 pour une image à 256 lignes ou colonnes.

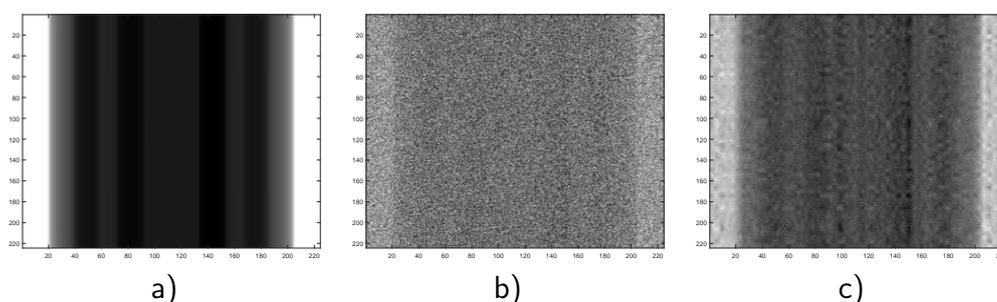


Figure 7.9 – Image R-X, bruitée avec du bruit Gaussien à 10 dB. Rangs de référence 20 % : a) Pure ; b) Bruitée ; c) MM-PSO

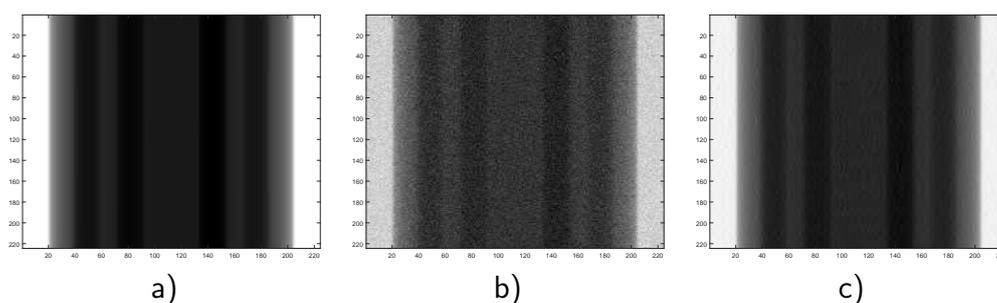


Figure 7.10 – Image R-X, bruitée avec du bruit Gaussien à 30 dB. Rangs de référence 20 % : a) Pure ; b) Bruitée ; c) MM-PSO

On remarque dans les Figs. 7.9 et 7.10 que les résultats de débruitage sont clairement visibles et intéressants. Cela est dû à la structure de l'image, qui contient de grandes droites verticales, et dont les rangs sont donc faibles. La partie utile de l'image est donc bien préservée, bien que les rangs soient de valeur faible dans la référence. Le résultat est plus difficile à apprécier dans l'image 7.11 : le

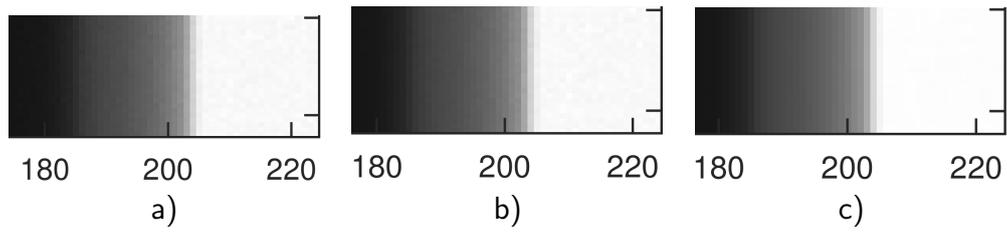


Figure 7.11 – Image R-X, naturellement bruitée avec du bruit de Poisson (zoom).
 a) image brute ; b) MM-PSO avec des rangs en référence à 60 % ;
 c) MM-PSO avec des rangs en référence à 20 %,

SNR est certainement très élevé. On parvient cependant à remarquer qu'il y a moins de bruit lorsque les rangs choisis en référence sont faibles (Fig. 7.11 c). En définitive, c'est une application intéressante au vu de la structure des images qui se prête bien à nos algorithmes par sous-espaces.

7.4 Conclusion

Dans ce travail, une méthode nommée MWPT-MWF-RE a été proposée pour estimer les multiples valeurs de rang nécessaires à un algorithme de débruitage par filtre de Wiener multidimensionnel inséré dans la décomposition en paquets d'ondelettes multidimensionnelle. Nous avons adapté une méthode d'optimisation bio-inspirée dite 'PSO' soit *particle swarm optimization* ou optimisation par essaim de particules. Tous les résultats comparatifs obtenus n'ont pas été présentés dans ce manuscrit. Nous avons en effet obtenu des résultats avec d'autres méthodes, de principe très différent telles Perona-Malik (Cf [173] pour les détails). Nous avons eu accès à des données expérimentales *via* des collaborations avec l'IRSTEA et le CPPM : des images en fluorescence de feuilles, et des images RX multispectrales.

En définitive, en ce qui concerne les applications considérées : les images en fluorescence de feuilles se prêtent bien à nos méthodes fondées sur la décomposition en ondelettes dans le sens où elles présentent de nombreux détails à préserver. Les images RX multispectrales se prêtent bien elles aussi à nos méthodes, mais plutôt parce qu'elle incluent un traitement par projection sur un sous espace signal. en effet il est d'autant plus facile de préserver la partie utile des données que celle-ci correspond à une valeur faible de dimension du sous-espace signal, donc de rang. Et dans l'application considérée, le rang des images à retrouver est faible. Cependant, dans ces deux applications, les résultats obtenus sur des images naturellement bruitées peuvent paraître décevants : nous faisons certainement face à un bruit de Poisson et pas à un bruit Gaussien. Une perspective de ce travail pourrait donc être la conception d'un filtre multimodal adapté à ce type de bruit.

8 Projet de recherche

8.1 Contexte actuel, introduction

Le dernier rapport de conjoncture section 7 du CNRS [150], datant de 2014, pointe comme thème émergent, entre autres, le traitement des grandes masses de données, la gestion intelligente des problèmes inverses présents dans la conception de systèmes d'acquisition de signaux et d'images. Il note également l'intérêt des réseaux de neurones et l'apprentissage profond (deep learning) pour se passer de modèles physiques de représentation de données ; l'intérêt des graphes comme nouveaux modèles de représentation, et de la co-conception capteur-traitement pour des systèmes d'imagerie optimisant de façon conjointe acquisition et traitement des données.

Plus près du monde industriel, le rapport insiste sur l'importance de l'innovation dans le domaine des systèmes embarqués pour un grand nombre de secteurs dont la robotique. Le rapport avait prédit l'émergence de modèles bio-inspirés dans le développement de nouveaux outils en traitement d'image en dimension N , travail qui a été présenté dans ce manuscrit (Cf. Chapitres 6 et 7). Il prévoit que le codage bio-inspiré pourrait être utilisé dans le domaine de la compression de données. La manipulation 'dextre' d'objets serait aussi un défi à relever dans les prochaines années.

Le rapport pointe comme l'une des forces de la recherche en France dans ce domaine 'un soutien institutionnel marqué', de par l'existence du GDR ISIS (information, signal, image et vision) et du GDR MIA (mathématiques de l'imagerie et ses applications). Par exemple, les thématiques abordées lors de réunions du GdR ISIS en 2019 sont le traitement et l'analyse de données multidimensionnelles, massives, de fiabilité incertaine et à large diversité de mesures ; les modèles tensoriels à rang réduit ; la réduction de tenseurs d'ordre élevé sous forme de réseaux/graphes ; l'apprentissage des réseaux de neurones (superficiels et profonds) à l'aide des modèles tensoriels, la décomposition des tableaux multidimensionnels de données à valeurs discrètes (par exemple les tenseurs binaires), le couplage des données multidimensionnelles et la super-résolution, la détection de rang et l'identifiabilité sous contraintes de non-négativité et/ou de parcimonie, le traitement des tenseurs de très grandes dimensions et/ou d'ordres élevés, etc.

Mes perspectives de recherche s'intègrent naturellement dans ces paradigmes. Premièrement (section 8.2), dans la continuité directe de la thèse de Benoit Martin, je souhaite appliquer le GWO mixte à des données synthétiques appropriées. Suivant l'idée d'estimer conjointement des paramètres dédiés au débruitage et à un traitement donné comme le démélange, la question qui se pose est la suivante : les paramètres optimaux de débruitage seront-ils les mêmes quelle que

soit l'application que l'on vise conjointement ? Tout prête à penser que non, mais il est nécessaire de faire des investigations pour le prouver. Sur les aspects plus théoriques qui touchent aux GWO mixte, je souhaite le faire évoluer vers un algorithme 'dynamique' avec un espace de recherche qui se reconfigure au cours des itérations.

Deuxièmement (section 8.3), mes perspectives de recherche découlent d'une collaboration avec le LEAT qui a donné lieu à de premières expériences et à une publication commune en conférence. Il s'agit de réaliser la co-conception d'un système alliant acquisition et exploitation d'images radar. Cela pourrait prendre la forme d'un co-encadrement de thèse. Il s'agit là, notamment, d'appliquer le GWO mixte à l'estimation conjointe de paramètres concernant à la fois l'acquisition et le traitement des données radar dans le but de diminuer un taux de fausse reconnaissance.

Troisièmement (section 8.4), je prévois des travaux plus applicatifs qui impliqueraient un étudiant en thèse pour lequel une demande de financement vient d'être acceptée au moment de l'écriture de ce manuscrit. Nous nous fonderions notamment sur les travaux de Nabil Boughnim concernant la reconnaissance de posture de la main (Cf section 5.3 du Chap. 5), et sur les méthodes d'optimisation méta-heuristiques développées par Benoit Martin (Cf Chap. 6). Cela pour une application en robotique : on s'emploierait par exemple à mettre au point une technique de compression vidéo, peut-être fondée sur le morphing, ou pourquoi pas, comme le préconise le rapport de conjoncture, sur du codage bio-inspiré. Ce troisième point, que je compte mener en collaboration avec l'équipe Epsilon (notamment Sébastien Guenneau) cadre bien avec la réorganisation du laboratoire en 'thèmes' plutôt qu'en 'équipes' : il s'agit d'une activité transverse, recommandée dans la politique de décloisonnement des équipes à l'Institut Fresnel.

8.2 Adaptation et application du GWO mixte

Le GWO mixte a fait ses preuves dans des simulations théoriques et sur une application à l'imagerie. On pourrait l'appliquer à l'estimation du nombre de spectres sources dans le cadre du démélange de spectres (sous-section 8.2.1), ou à un problème inverse sur des données simulées en traitement d'antenne (sous-section 8.2.2). A plus long terme, on peut même, pourquoi pas, penser à des évolutions originales inspirées par la théorie des bifurcations de Poincaré et la théorie des catastrophes de Thom (sous-section 8.2.3).

8.2.1 Application du GWO mixte au démélange contraint de spectres

Je souhaite développer quelques-unes de mes idées concernant des applications du GWO mixte que j'ai conçu avec mon doctorant Benoit Martin :

Dans la continuité directe de la thèse de Benoit Martin, l'algorithme du GWO mixte pourrait être appliqué à l'estimation du nombre de spectres 'endmembers' dans un modèle de mélange.

Soit $\mathbf{x}(i, j)$ un pixel spectral, sélectionné à l'emplacement (i, j) d'une image multispectrale ou hyperspectrale. Ce pixel spectral résulte dans un modèle éprouvé d'une partie mélange avec des contraintes de positivité, et d'une partie 'bruit' $\mathbf{n}(i, j)$:

$$\mathbf{x}(i, j) = \sum_{k=1}^{k=K} \lambda_k^{(i,j)} \mathbf{s}_k + \mathbf{n}(i, j) \quad (8.1)$$

Pour une image à l bandes spectrales, voici les paramètres associés à ce modèle :

1. $k \in 1, \dots, K$: indice du spectre de base ou endmember ;
2. $\lambda_k^{(i,j)} \in \mathbb{R}$: coefficient de mélange ;
3. $\mathbf{s}_k \in \mathbb{R}, \in \mathbb{R}^l$: endmember d'indice k , supposé connu ou pas

Le paramètre K , nombre de 'endmembers' de base, appartient à \mathbb{N}^* , soit un ensemble discret.

Le paramètre λ_k appartient à un espace continu : $0, \dots, 1$.

Dans les méthodes classiques de type factorisation en matrices non négatives (nonnegative matrix factorization, NMF) que j'ai pu étudier et tester [172], les valeurs des l composantes de \mathbf{s}_k sont estimées pour tout k , avec des contraintes de positivité comme pour λ_k . Le verrou à lever réside dans l'estimation du paramètre K , qui est supposé connu quand on applique la NMF. Par ailleurs, pour des valeurs élevées de l , le nombre de paramètres à estimer semble trop grand pour que l'on puisse appliquer notre GWO mixte sans un travail d'adaptation. Une intuition que j'aimerais suivre m'amène à envisager la combinaison de méthodes du type NMF et de notre algorithme du GWO mixte. On peut penser à nouveau à un débruitage et un démélange conjoint : soit pour estimer au mieux toutes les valeurs de coefficients de mélange, pour tous les endmembers ; soit pour déterminer l'identité du endmember présent en plus grande proportion. Un résultat intéressant serait de constater que les paramètres optimaux pour le débruitage diffèrent, que l'on vise la première ou la deuxième application.

8.2.2 Estimation de paramètres dans la théorie du traitement d'antenne

Sur un sujet plus éloigné de mes travaux, mais qui concerne le traitement d'antenne, que j'ai étudié pendant ma thèse et en début de carrière de MCF, certains modèles de signaux issus du traitement d'antenne pourraient être analysés via notre méthode d'optimisation mixte. Les méthodes de traitement d'antenne

consistent à déterminer les valeurs de paramètres de sources émettrices, comme l'amplitude, la direction d'arrivée, le modèle de vecteur d'onde, etc.

Voici un modèle de signal qui convient à ce type d'analyse paramétrique :

Soit $\mathbf{s}(t)$ un signal à l'instant t décomposé en une partie 'utile' et une partie 'bruit' $\mathbf{n}(t)$:

$$\mathbf{s}(t) = \sum_{k=1}^{k=K} a_k \exp(-jf_m(\theta_k)t) + \mathbf{n}(t) \quad (8.2)$$

Voici les paramètres associés à ce modèle :

1. $k \in 1, \dots, K$: indice de la source ;
2. $a_k \in \mathbb{R}$: amplitude ;
3. $\theta_k \in \mathbb{R}, \in 0, \dots, 2\pi$: direction d'arrivée
4. $f_m, m \in 1, \dots, M$: modèle de vecteur d'onde

Le paramètre M est supposé connu, il s'agit du nombre d'expression au choix pour le vecteur d'onde.

Le paramètre K n'est pas forcément connu, et appartient à un ensemble discret. S'il n'est pas connu, le paramètre a_k sera forcé à 0 $\forall k > K$ pour toute valeur candidate de K .

Les paramètres a_k et θ_k appartiennent à un espace continu : \mathbb{R} pour le premier, et $0, \dots, 2\pi$ pour le second.

Le paramètre f_m appartient à un espace discret : nous supposons qu'il existe M expressions admissibles pour le vecteur d'onde.

Mon objectif dans ce cadre-là serait d'estimer toutes ces valeurs de paramètres pour un signal donné, avec l'algorithme du GWO mixte.

D'autres applications numériques peuvent être envisagées pour démontrer les capacités d'adaptation de notre algorithme GWO mixte : dans le cadre de toute méthode par sous-espace, il est nécessaire de connaître le nombre de vecteurs 'engendrant le sous-espace signal'. Ce nombre entier pourrait être estimé conjointement avec les autres paramètres du problème considéré, qu'ils soient discrets ou continus.

8.2.3 Quelques évolutions envisagées pour les aspects théoriques du GWO mixte

Quelques évolutions un peu plus spéculatives mais qui me paraissent séduisantes me sont inspirées par le mode de fonctionnement du GWO mixte. Actuellement, elle donne la possibilité de réaliser un affinage dans une espace de recherche continu de valeurs estimées appartenant à un espace de recherche discret. La transition du discret vers le continu se fait en pratique via un paramètre à régler par l'utilisateur. On pourrait penser à une transition automatique. Pourquoi ne pas penser dans ce cadre-là à la théorie des bifurcations de Poincaré, et à

la théorie des catastrophes de René Thom [155]. On sait que la théorie du chaos a été adapté avec succès à l'optimisation bio-inspirée [128, 38], pourquoi pas d'autres théories qui ont trait aux systèmes dynamiques [170]. La théorie des bifurcations étudie les changements survenant dans un système d'équations différentielles ordinaires soumis à des perturbations. Cela fait penser aux difficultés observées par une méthode d'optimisation dans le cas où la fonction objectif est à minimum mouvant. La théorie des catastrophes étudie la transition entre un phénomène continu stable et un phénomène instable (typiquement une vague issue de la houle, qui se brise).

Un objectif à long terme peut consister à se baser sur ces théories pour aboutir à un espace de recherche dynamique, qui évolue au cours des itérations et qui serait 'auto-adaptable' selon la fonction objectif à minimiser. Par exemple, il semble naturel de resserrer le maillage de l'espace de recherche autour des meilleures positions obtenues par les agents de recherche au cours des itérations. On pourrait également estimer de façon automatique la dernière itération d'une recherche purement discrète, avant une transition vers une recherche continue. Pour aboutir à des résultats concrets dans ce domaine, les théories des bifurcations et des catastrophes pourraient au moins nous inspirer.

8.3 Estimation de paramètres dans le contexte du radar

Une collaboration avec le laboratoire LEAT a donné lieu à quelques premières expériences de co-conception d'un système d'acquisition et d'exploitation de données radar. Le système d'acquisition radar fonctionne aux alentours de 90 GHz, donc des ondes millimétriques. C'est le même type d'onde qui d'ailleurs ont été utilisées pour obtenir la première image réelle (non simulée) d'un trou noir, dans la galaxie M87. L'image a été rendue publique le 10 avril 2019 à 15H07 exactement.

De premiers travaux concernant le co-conception d'un système d'acquisition et de traitement de données radar millimétriques ont été réalisés et acceptés pour publication en conférence [127], qui aura lieu fin septembre 2019. Ces travaux pourraient être poursuivis dans le cadre d'une thèse en co-encadrement entre le LEAT à Nice et l'Institut Fresnel à Marseille. C'est pour moi une ouverture vers le domaine du radar dans ses aspects matériels. Ces premiers résultats sont résumés ci-après :

Avec un système innovant d'acquisition de données radar [136], l'équipe de Claire Migliaccio au LEAT a imagé des couteaux, des objets similaires à des pistolets, et des objets non létaux. Pour cela, le scanner de la Fig. 8.1 est utilisé. L'objet d'intérêt est posé sur une tour en 'Rohacell' qui minimise les interférences électromagnétiques. Le scanner peut opérer entre 75 et 110 GHz mais on se limite à 94 ou 96 GHz. Il est possible de choisir entre une polarisation horizontale

et une polarisation verticale grâce à un moteur installé sur le bras articulé. On a accès à l'amplitude et à la phase.

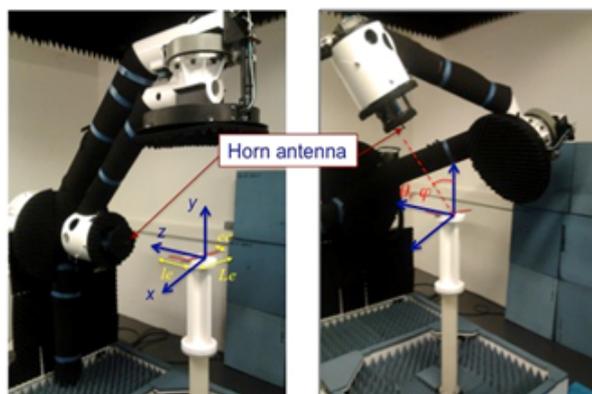


Figure 8.1 – Scanner 3D pour deux positions d'antenne



Figure 8.2 – Pistolet, pistolet caché

La Figure 8.2 montre le processus d'acquisition d'un pistolet caché. Nous avons pu montrer [127] que les acquisitions en polarisation H et les acquisition en polarisation V semblent complémentaires (Fig. 8.3). La figure 8.4 est une combinaison booléenne des images issues des deux modalités de polarisation.

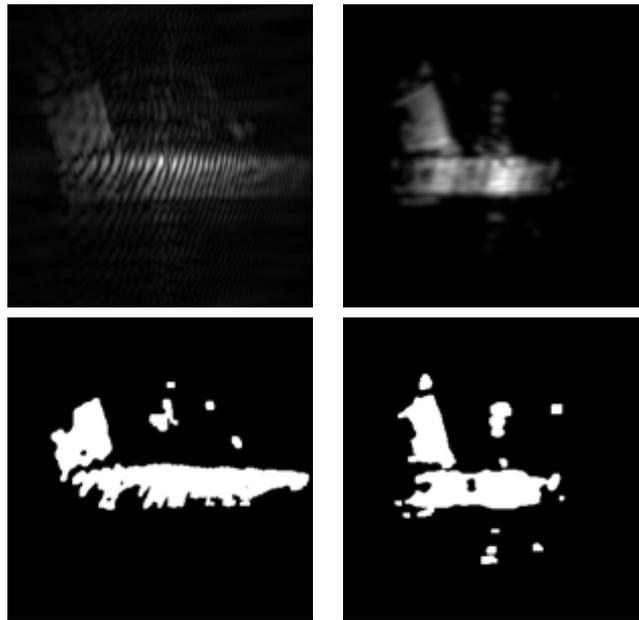


Figure 8.3 – Pistolet caché : résultats de segmentation. (a) polarisation H : image à traiter ; (b) polarisation V : image à traiter ; (c) polarisation H : morphologie mathématique ; (d) polarisation V : morphologie mathématique



Figure 8.4 – Combinaison H et V

Ce travail prometteur pourrait être poursuivi, en vue d'optimiser les résultats de classification d'objet. C'est un problème de co-conception. Dans ce problème, il existe au moins deux paramètres pour l'acquisition, et au moins deux paramètres pour le traitement d'image :

1. la polarisation de l'onde radar ;
2. la fréquence de l'onde radar ;
3. le type de caractéristique extrait de l'image en vue de la classification ;
4. la valeur de rang pour une réduction de dimension ;
5. les paramètres du classifieur.

Les paramètres du classifieur peuvent être le type de noyau si on utilise un SVM, ou le nombre de niveaux si on utilise une méthode d'apprentissage profond. Tous ces paramètres prennent leurs valeurs dans des espaces de recherche discret. En suivant les notations proposées dans [125], voici, dans le tableau 8.1, la liste des quatre premiers paramètres, et les propriétés des espaces de recherche associés.

i	Espace de recherche	H_i	\mathbf{d}_i^{val}
1		3	$[H, V, H + V]^T$
2		2	$[94, 96]^T$
3		4	$[HOG, SD, \mathbf{Z}, Comb]^T$
4		6	$[5, 25, 50, 100, 200, 250]^T$

Table 8.1 – Espaces de recherche pour la méthode d'optimisation

Afin de mettre en oeuvre cette partie de mon projet, il est envisagé une thèse en collaboration avec le LEAT. Certains principes de travail intéressants pourraient être adoptés, comme le fait de coder tous les programmes en python, et d'établir une plateforme collaborative efficace pour la rédaction en ligne, la compilation de programmes à distance, etc.

8.4 Reconversion thématique vers la reconnaissance d'images et le morphing en robotique

Dans le cadre d'une collaboration inter-équipe encouragée par le Laboratoire s'offre à moi la possibilité d'encadrer de nouveau un étudiant en thèse. Il s'agit de Ronald Aznavourian, qui travaillera sur des systèmes embarqués dans des robots humanoïdes. Cette thèse, dont le financement par l'ANRT a été accepté à la fin mars 2019, impliquera l'entreprise AXYN Robotique, qui produit des robots interactifs (nommés UBBO). Dans ce cadre-là, nous souhaitons introduire des algorithmes de traitement d'image, qui ont trait à la reconnaissance et au tracking, comme ceux utilisés dans le cadre de la thèse de Benoit Martin. D'un point de vue plus académique, il me semble intéressant de créer de nouvelles méthodes d'estimation de paramètres qui mêlent l'optimisation bio-inspirée et le morphing, qui semble être un puissant outil d'interpolation. J'ai décrit dans [32] les prémices d'un tel principe d'accélération d'une méthode d'optimisation. Il s'agissait alors d'interpolation par splines. Utiliser le morphing comme méthode d'interpolation bidimensionnelle me semble possible. Depuis quelques années, notre Laboratoire, l'Institut Fresnel, encourage les recherches inter-équipes, notamment par la création de grandes thématiques. L'équipe Epsilon de l'Institut Fresnel serait impliquée dans cette thèse, puisque Sébastien Guenneau, membre d'Epsilon, a encadré Ronald Aznavourian lors d'un stage Ingénieur. Certains sujets me rapprochent de l'équipe Epsilon, comme le bio-inspiré [12], ou le morphing [11], que j'ai abordé succinctement avec des étudiants en projet (Gaied *et. al.*, Sitti *et. al.* en 2017, Barre *et. al.* en 2019), cette réorientation de mon domaine de recherche vers des thématiques proches de la robotique et des systèmes embarqués ne sera pas forcément aisée mais le sujet offre des perspectives d'avenir. Voici quelques objectifs à court, moyen, et long terme.

8.4.1 Court terme

Les objectifs à court terme de la thèse découlent des récentes avancées de l'équipe GSM dans le domaine de l'optimisation bio-inspirée [125]. Cette méthode pourrait estimer les paramètres d'un algorithme de classification de type 'machines à vecteurs de support' (SVM). Seules des méthodes d'optimisation 'continues' telle 'Particle swarm optimization' ont été utilisées pour régler les paramètres d'un SVM [88]. Or ces paramètres sont à valeurs dans des espaces à la fois discrets et continus. Utiliser notre méthode mixte serait novateur et plus performant. le critère à minimiser, toujours nécessaire lorsqu'on veut appliquer une méthode d'optimisation, serait le taux de fausse reconnaissance. Du point de vue applicatif, l'algorithme SVM ainsi 'optimisé' serait dédié à la reconnaissance d'objet dans une scène. Par exemple, on peut envisager une expérience ludique,

en maison de retraite, de reconnaissance de visage. Le robot pourrait énoncer un 'Bonjour MMme' spécifiquement adressé à la personne 'MMme' qui se trouve en face de lui. Cela semble possible avec un SVM multiclasse tant que le nombre de personnes cibles est relativement restreint (une dizaine).

On peut envisager une méthode de reconnaissance de postures de la main. De premiers travaux ont été menés à l'institut Fresnel [21] sans intégration dans un système industriel toutefois. Dans un premier temps, nous pourrions faciliter la tâche du robot en fournissant à l'utilisateur un gant vert. Lors de la thèse de Benoit Martin, soutenue en octobre 2018 à l'institut Fresnel, nous n'avions pas eu le temps de mettre à l'épreuve la méthode du GWO mixte sur un problème d'estimation des paramètres d'un SVM. En effet nous ne disposions pas d'une base de données adéquate. En mettant en oeuvre le principe de l'acquisition avec un gant vert, nous disposerions d'un grand nombre d'images facilement exploitables. Cela pourrait conduire à des applications très intéressantes pour la société AXYN Robotique. Par exemple, dans le langage des signes, chaque lettre de l'alphabet et certains mots sont représentés par des positions particulières de la main et des doigts. On pourrait alors associer un fichier mp3 à chacun de ces signes, ce qui permettrait une traduction sommaire de ces signes en version audible. Un enfant muet pourrait alors "communiquer" avec des enfants ou des adultes ne connaissant pas la langue des signes. Nous viserions tout d'abord une preuve de concept avec un dictionnaire de quelques signes pour une première version applicative.

8.4.2 Moyen terme

On peut aussi envisager, dans le même cadre, une application de suivi d'une personne 'référéncée', de dos. Cela est innovant car le suivi de personne passe le plus souvent par la méthode de Viola-Jones [160], qui admet pour hypothèse de travail que la personne à suivre est de face. Son implantation a été faite dans l'équipe GSM et a donné de bons résultats sur des vidéos réalistes [122]. Lors du stage de Xavier Daïni, nous avons intégré cette méthode dans un nano-ordinateur Raspberry Pi afin de déplacer le robot d'après les coordonnées du centre de la détection. Cela pourrait être un point de départ pour créer un algorithme plus innovant : Nous pourrions créer un détecteur spécifiquement dédié aux personnes vues de dos. Cela permettrait au robot de suivre une personne dans des couloirs par exemple. Une première approche consisterait à entraîner la méthode de Viola-Jones avec d'autres images que des visages vus de face. On pourrait utiliser des personnes vues de dos. L'inconvénient de cette approche est que les ondelettes de Haar utilisées dans la méthode de Viola-Jones ne sont peut-être pas adaptées pour caractériser des personnes de dos. Une seconde approche consisterait à utiliser un classifieur SVM entraîné avec des images de personnes vues de dos. Ces applications peuvent être qualifiées de 'supervisées' dans le sens où,

sachant ce que l'on a à reconnaître, on fait en sorte, *a priori*, de disposer d'une base d'entraînement pour les algorithmes de reconnaissance. La méthode ne serait peut-être donc valable, comme on l'a vu en sous-section 8.4.1, que pour un nombre de personnes restreint.

Un sujet d'intérêt pour Axyn serait l'utilisation d'un bras robotisé pour que le robot ouvre une porte. On se restreint au cas où le robot ouvre en poussant la porte. La poignée pourrait être localisée par une méthode de deep learning. Une méthode d'apprentissage pourrait nous donner la distance à la poignée en fonction de la taille de la détection (poignée ou cadre de la porte).

8.4.3 Long terme

Un objectif que nous nous fixons à long terme consisterait à produire une version automatisée d'un algorithme de morphing, par la localisation intelligente de ce que l'on appelle des points de contrôle. Ces points de contrôle vont par paire, et sont placés dans l'image de départ et l'image d'arrivée.

C'est un verrou qu'il est important de lever pour ce type de méthode, car d'un algorithme de morphing automatisé découleraient de nombreuses applications, comme le montre le brevet déposé par l'équipe Epsilon concernant l'accélération des méthodes numériques par le morphing. On peut penser également à une méthode de compression de données vidéo en reconstruisant des données manquantes par le morphing. Cela peut être utile à l'application UBBO dans le cas où la connexion WiFi est mauvaise. La difficulté dans ce travail consiste à définir un critère à minimiser par la méthode d'optimisation. Sinon, une technique de codage évoquée dans [150] pourrait faire l'objet de recherches. Certaines études ont été faites pour le morphing appliqué aux visages qui impliquent par exemple une méthode d'optimisation bio-inspirée [74]. Ces méthodes sont restreintes au cas des visages. La nouveauté consisterait à étendre le morphing avec estimation automatique des points de contrôle à toute image. Dans le vocabulaire du traitement d'image il s'agit de localiser des 'points saillants'. Nous avons déjà appliqué des méthodes de type SIFT [93] et SURF [154], et mis au point une méthode d'appariement des points. On pourrait par exemple trouver la valeur optimale du nombre de points pour un contexte donné. Celui-ci, d'ailleurs, doit être le même pour les images source et cible.

En pratique, outre une amélioration du débit en cas de WiFi défaillant, le robot UBBO pourrait être utilisé en hôpital pour montrer à un enfant le résultat d'une opération du visage. Si l'on imagine un enfant souffrant d'une déformation du visage, réaliser une opération de morphing entre son visage et une image de visage non déformé lui permettrait d'envisager son aspect après l'opération, et donc à mieux accepter cette dernière.

8.5 Conclusion

Mes objectifs se déclinent en des objectifs à court terme avec l'estimation de paramètres en traitement d'antenne, mais aussi des problématiques de classification supervisée ou non supervisée, avec toujours cette volonté d'optimiser de façon rigoureuse les paramètres en jeu. Ainsi, que ce soit pour l'application de co-conception d'un système radar ou pour l'application de robotique, je pourrais envisager d'adapter à ces problématiques des algorithmes de deep learning en plus des méthodes d'optimisation bio-inspirées que j'ai évoquées. Comme je l'ai fait jusqu'à présent au cours de mon parcours de Maître de Conférences, je pourrais mener certaines activités plus 'risquées' ou en amont de façon autonome, en conservant comme objectif principal, la réussite des doctorants.

Bibliographie

- [1] K. ABED-MERAIM, H. MAÎTRE et P. DUHAMEL. « Blind multichannel image restoration using subspace based method ». In : *IEEE International Conf. on Acoustics Systems and Signal Processing*. Hong Kong, China, avr. 2003 (cf. p. 155).
- [2] H. K. AGHAJAN et T. KAILATH. « A subspace Fitting Approach to Super Resolution Multi-Line Fitting and Straight Edge Detection ». In : *Proc. of IEEE ICASSP 3* (1992), p. 121-124 (cf. p. 66).
- [3] H. AGHAJAN et T. KAILATH. « SLIDE : Subspace-based Line detection ». In : *IEEE Trans. on PAMI* (1994), p. 1057-1073 (cf. p. 67, 68).
- [4] H.K. AGHAJAN. « Subspace Techniques for Image Understanding and Computer Vision ». In : *PhD Thesis, Stanford University* (1995) (cf. p. 66, 68).
- [5] H.K. AGHAJAN et T. KAILATH. « SLIDE : subspace-based line detection ». In : *IEEE int. conf. ASSP 5* (1993), p. 89-92 (cf. p. 66-68).
- [6] Hamid K AGHAJAN et Thomas KAILATH. « Sensor array processing techniques for super resolution multi-line-fitting and straight edge detection ». In : *IEEE Transactions on Image Processing 2.4* (1993), p. 454-465 (cf. p. 66, 67, 80, 85, 88, 90).
- [7] Timo AHONEN, Abdenour HADID et Matti PIETIKÄINEN. « Face Recognition with Local Binary Patterns ». In : *Computer Vision - ECCV 2004*. Sous la dir. de Tomás PAJDLA et Jiří MATAS. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004, p. 469-481. ISBN : 978-3-540-24670-1 (cf. p. 112).
- [8] Kelson R. T. AIRES, Andre M. SANTANA et Adelardo A. D. MEDEIROS. « Optical Flow Using Color Information : Preliminary Results ». In : *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing*. SAC '08. Fortaleza, Ceara, Brazil : ACM, 2008, p. 1607-1611. ISBN : 978-1-59593-753-7. DOI : [10.1145/1363686.1364064](https://doi.org/10.1145/1363686.1364064) (cf. p. 109).
- [9] Mohammad Madallh ALHABAHBA, Omer Hassan Ali MAHFOODH, Ambigapathy PANDIAN et al. « Check This Word Out! Exploring the Factors That Affect Students' Vocabulary Learning Using Smartphones via Partial Least Squares ». In : *Education Research International 2014*, Article ID 672031 (2014) (cf. p. 54).
- [10] Yoann ALTMANN, Abderrahim HALIMI, Nicolas DOBIGEON et al. « Supervised nonlinear spectral unmixing using a postnonlinear mixing model for hyperspectral imagery ». In : *IEEE Transactions on Image Processing 21.6* (2012), p. 3017-3025 (cf. p. 144).

- [11] Ronald AZNAVOURIAN et Sébastien GUENNEAU. « Morphing for faster computations in transformation optics ». In : *Optics Express* 22 (2014), p. 28301-28315. DOI : [10.1364/OE.22.028301](https://doi.org/10.1364/OE.22.028301). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01084744> (cf. p. 180).
- [12] Ronald AZNAVOURIAN, Tania PUVIRAJESINGHE, S BRÛLÉ et al. « Spanning the scales of mechanical metamaterials using time domain simulations in transformed crystals, graphene flakes and structured soils ». In : *Journal of Physics : Condensed Matter* (2017). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01395843> (cf. p. 180).
- [13] B.D LUCAS et T KANADE. « An iterative image registration technique with an application to stereo vision ». In : *Procs. of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (1981) (cf. p. 109, 123).
- [14] D. H. BALLARD. « Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes ». In : *Pat. Rec.* 13.2 (1981), p. 111-22 (cf. p. 104).
- [15] S. S. BEAUCHEMIN et J. L. BARRON. « The computation of optical flow ». In : *ACM Computing Surveys* 27 (1995), p. 433-466 (cf. p. 109).
- [16] Zahra BEHESHTI, Siti Mariyam SHAMSUDDIN et Shafaatunnur HASAN. « Memetic binary particle swarm optimization for discrete optimization problems ». In : *Information Sciences* 299 (2015), p. 58-84. ISSN : 0020-0255. DOI : <http://doi.org/10.1016/j.ins.2014.12.016>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025514011530> (cf. p. 133).
- [17] Keni BERNARDIN, Alexander ELBS et Rainer STIEFELHAGEN. « Multiple object tracking performance metrics and evaluation in a smart room environment ». In : *Sixth IEEE International Workshop on Visual Surveillance, in conjunction with ECCV*. T. 90. Citeseer, 2006, p. 91 (cf. p. 123).
- [18] S BINITHA et S.S. SATHYA. « A survey of Bio inspired optimization algorithms ». In : 2 (jan. 2012), p. 137-151 (cf. p. 132).
- [19] Nabil BOUGHNIM, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems : 14th International Conference, ACIVS 2012, Brno, Czech Republic, September 4-7, 2012. Proceedings ». In : sous la dir. de Jacques BLANC-TALON, Wilfried PHILIPS, Dan POPESCU et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. Chap. Hand Posture Classification by Means of a New Contour Signature, p. 384-394. ISBN : 978-3-642-33140-4. DOI : [10.1007/978-3-642-33140-4_34](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33140-4_34). URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33140-4_34 (cf. p. 40, 107).
- [20] Nabil BOUGHNIM, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Fast and improved hand classification using dimensionality reduction and test set reduction. » In : *ICASSP*. 2013, p. 1971-1975. (Visité le 15/04/2016) (cf. p. 28, 31, 40, 107).

- [21] Nabil BOUGHNIM, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Hand posture recognition using jointly optical flow and dimensionality reduction ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2013.1 (2013), p. 1-22. URL : <http://link.springer.com/article/10.1186/1687-6180-2013-167> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 28, 31, 37, 107, 115, 181).
- [22] Nabil BOUGHNIM, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Hand posture recognition using jointly optical flow and dimensionality reduction ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2013.1 (nov. 2013), p. 167. ISSN : 1687-6180. DOI : [10.1186/1687-6180-2013-167](https://doi.org/10.1186/1687-6180-2013-167) (cf. p. 112).
- [23] S. BOURENNANE, C. FOSSATI et J. MAROT. « About Noneigenvector Source Localization Methods ». en. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2008 (2008), p. 1-14. ISSN : 1687-6172, 1687-6180. DOI : [10.1155/2008/480835](https://doi.org/10.1155/2008/480835). URL : <http://asp.eurasipjournals.com/content/2008/1/480835> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 38).
- [24] S. BOURENNANE et J. MAROT. « Line parameters estimation by array processing methods ». In : *IEEE ICASSP 4* (2005), p. 965-968 (cf. p. 67).
- [25] S. BOURENNANE et J. MAROT. « Estimation of straight line offsets by a high resolution method ». In : *IEE proceedings - Vision, Image and Signal Processing* 153 (2006), p. 224-229 (cf. p. 67).
- [26] S. BOURENNANE et J. MAROT. « Estimation of straight line offsets by high-resolution method ». en. In : *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing* 153.2 (2006), p. 224. ISSN : 1350245X. DOI : [10.1049/ip-vis:20050149](https://doi.org/10.1049/ip-vis:20050149). URL : http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-vis_20050149 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 39, 68).
- [27] Salah BOURENNANE, Caroline FOSSATI et Julien MAROT. « Contour estimation in images using virtual signals ». en. In : *Optical Engineering* 49.5 (mai 2010), p. 057002. ISSN : 0091-3286. DOI : [10.1117/1.3421576](https://doi.org/10.1117/1.3421576). URL : <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3421576> (visité le 25/04/2016) (cf. p. 37, 82).
- [28] Salah BOURENNANE, Caroline FOSSATI et Julien MAROT. « Localization of Narrow-Band Sources in Unknown Spatially Correlated Noise ». en. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010 (2010), p. 1-12. ISSN : 1687-6172, 1687-6180. DOI : [10.1155/2010/732591](https://doi.org/10.1155/2010/732591). URL : <http://asp.eurasipjournals.com/content/2010/1/732591> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 37).

- [29] Salah BOURENNANE et Julien MAROT. « Line parameters estimation by array processing methods [image line characterization applications] ». In : *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. Proceedings. (ICASSP'05). IEEE International Conference on*. T. 4. IEEE, 2005, p. iv-965. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1416171 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 41).
- [30] Salah BOURENNANE et Julien MAROT. « Contour Estimation by Array Processing Methods ». en. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2006 (2006), p. 1-16. ISSN : 1687-6172, 1687-6180. DOI : [10.1155/ASP/2006/95634](https://doi.org/10.1155/ASP/2006/95634). URL : <http://asp.eurasipjournals.com/content/2006/1/095634> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 80).
- [31] Salah BOURENNANE et Julien MAROT. « Contour estimation by array processing methods ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2006.1 (2006), p. 095634 (cf. p. 38, 66).
- [32] Salah BOURENNANE et Julien MAROT. « Optimization and interpolation for distorted contour estimation ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*. T. 2. IEEE, 2006, p. II-II. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1660443 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 41, 180).
- [33] Cyril CARINCOTTE, Stéphane DERRODE et Salah BOURENNANE. « Unsupervised change detection on SAR images using fuzzy hidden Markov chains ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44.2 (2006), p. 432-441 (cf. p. 103, 104).
- [34] Yannick CAULIER, Klaus SPINNLER, Salah BOURENNANE et al. « New structured illumination technique for the inspection of high-reflective surfaces : application for the detection of structural defects without any calibration procedures ». In : *Journal on Image and Video Processing* 2008 (2008), p. 14 (cf. p. 100).
- [35] M-E. CELEBI et Y-A. ASLANDOGAN. « A Comparative Study of Three Moment-Based Shape Descriptors ». In : *ITCC'05 1* (2005), p. 788-793 (cf. p. 115).
- [36] M-A. CHARMI, S. DERRODE et F. GHORBEL. « Fourier-based geometric shape prior for snakes ». In : *Pattern Recognition Letters* 29.7 (2008), p. 897-904 (cf. p. 115).
- [37] Hua CHEN, Sabine VAN HUFFEL, Ad van den BOOM et al. « Subspace-based parameter estimation of exponentially damped sinusoids using prior knowledge of frequency and phase ». In : *Signal Processing* 59.1 (1997), p. 129-136 (cf. p. 96).

- [38] Ke CHEN, Fengyu ZHOU et Aling LIU. « Chaotic dynamic weight particle swarm optimization for numerical function optimization ». In : *Knowledge-Based Systems* 139 (2018), p. 23-40. ISSN : 0950-7051. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.10.011>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705117304719> (cf. p. 176).
- [39] Simon CONSEIL, Salah BOURENNANE et Lionel MARTIN. « Comparison of Fourier descriptors and Hu moments for hand posture recognition. » In : *EUSIPCO*. 2007, p. 1960-1964 (cf. p. 115).
- [40] N DOBIGEON, Y ALTMANN, N BRUN et al. « Linear and nonlinear unmixing in hyperspectral imaging ». In : *Data Handling in Science and Technology : Resolving Spectral Mixtures* (2016), p. 41 (cf. p. 143).
- [41] Marco DORIGO et Thomas STÜTZLE. « The ant colony optimization metaheuristic : Algorithms, applications, and advances ». In : *Handbook of metaheuristics*. Springer, 2003, p. 250-285 (cf. p. 133-135).
- [42] Russ C EBERHART, James KENNEDY et al. « A new optimizer using particle swarm theory ». In : *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. T. 1. New York, NY. 1995, p. 39-43 (cf. p. 133).
- [43] Kamran ETEMAD et Rama CHELLAPPA. « Discriminant analysis for recognition of human face images ». In : *Audio- and Video-based Biometric Person Authentication*. Sous la dir. de Josef BIGÜN, Gérard CHOLLET et Gunnilla BORGEFORS. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1997, p. 125-142. ISBN : 978-3-540-68425-1 (cf. p. 112).
- [44] E. FAZL-ERSI, M. E. MOUSA-PASANDI, R. LAGANIÈRE et al. « Age and gender recognition using informative features of various types ». In : *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Oct. 2014, p. 5891-5895. DOI : [10.1109/ICIP.2014.7026190](https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7026190) (cf. p. 112).
- [45] A. FOULONNEAU, P. CHARBONNIER et F. HEITZ. « Geometric shape priors for region-based active contours ». In : *ICIP'03* 3 (2003), p. 413-416 (cf. p. 115).
- [46] Amir Hossein GANDOMI, Xin-She YANG et Amir Hossein ALAVI. « Mixed variable structural optimization using Firefly Algorithm ». In : *Computers and Structures* 89.23 (2011), p. 2325-2336. ISSN : 0045-7949. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.002>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794911002185> (cf. p. 133).
- [47] Fuchang GAO et Lixing HAN. « Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters ». In : *Computational Optimization and Applications* 51.1 (2010), p. 259-277 (cf. p. 75, 92).

- [48] Tao GAO, X. L. FENG, He LU et al. « A novel face feature descriptor using adaptively weighted extended LBP pyramid ». In : *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 124.23 (déc. 2013), p. 6286-6291. ISSN : 0030-4026. DOI : [10.1016/j.ijleo.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.05.007) (cf. p. 112).
- [49] A.S. GEORGHIADES, P.N. BELHUMEUR et D.J. KRIEGMAN. « From Few to Many : Illumination Cone Models for Face Recognition under Variable Lighting and Pose ». In : *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intelligence* 23.6 (2001), p. 643-660 (cf. p. 112).
- [50] James J. GIBSON. *The perception of the visual world*. The perception of the visual world. Oxford, England : Houghton Mifflin, 1950. xii, 242 (cf. p. 109).
- [51] W. GONG, J. GONZALEZ et F. ROCA. « Human action recognition based on estimated weak poses ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* (2012) (cf. p. 116).
- [52] Robert O. GREEN, Charles M. SARTURE, Christopher J. CHOVIT et al. « AVIRIS : A New Approach to Earth Remote Sensing ». In : *Opt. Photon. News* 6.1 (jan. 1995), p. 30. DOI : [10.1364/OPN.6.1.000030](https://doi.org/10.1364/OPN.6.1.000030) (cf. p. 143).
- [53] Artyom M. GRIGORYAN, Edward R. DOUGHERTY et Sos S. AGAIAN. « Optimal Wiener and homomorphic filtration : Review ». en. In : *Signal Processing* 121 (avr. 2016), p. 111-138. ISSN : 01651684. DOI : [10.1016/j.sigpro.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.11.006). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168415003862> (visité le 10/06/2016) (cf. p. 158).
- [54] B. HALDER, H. AGHAJAN et T. KAILATH. « Propagation diversity enhancement to the subspace-based line detection algorithm ». In : *Nonlinear Image Processing VI* (1995), p. 320-328 (cf. p. 67).
- [55] Abderrahim HALIMI, Yoann ALTMANN, Nicolas DOBIGEON et al. « Non-linear unmixing of hyperspectral images using a generalized bilinear model ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49.11 (2011), p. 4153-4162 (cf. p. 144).
- [56] Robert M HARALICK, Karthikeyan SHANMUGAM et al. « Textural features for image classification ». In : *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics* 3.6 (1973), p. 610-621 (cf. p. 103, 104).
- [57] John H HOLLAND. « Genetic algorithms ». In : *Scientific american* 267.1 (1992), p. 66-72 (cf. p. 132, 146).
- [58] S HOLZWARTH, A MULLER, M HABERMEYER et al. « HySens-DAIS 7915/RO-SIS imaging spectrometers at DLR ». In : *Proceedings of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. 2003, p. 3-14 (cf. p. 143, 145).
- [59] M-K. HU. « Visual pattern recognition by moment invariants ». In : *IEEE trans. on Information Theory* 8 (1962), p. 179-187 (cf. p. 115).

- [60] Gary B. HUANG, Manu RAMESH, Tamara BERG et al. *Labeled Faces in the Wild : A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments*. Rapp. tech. 07-49. University of Massachusetts, Amherst, oct. 2007 (cf. p. 112).
- [61] H.Malcolm HUDSON et Thomas C.M. LEE. « Maximum likelihood restoration and choice of smoothing parameter in deconvolution of image data subject to Poisson noise ». In : *Computational Statistics and Data Analysis* 26.4 (1998), p. 393-410. ISSN : 0167-9473. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473\(97\)00041-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473(97)00041-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167947397000418> (cf. p. 158).
- [62] Jesper JENSEN, Søren Holdt JENSEN et Egon HANSEN. « Exponential sinusoidal modeling of transitional speech segments ». In : *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999. Proceedings., 1999 IEEE International Conference on*. T. 1. IEEE. 1999, p. 473-476 (cf. p. 96).
- [63] H. JIANG, J. MAROT, C. FOSSATI et al. « Circular contour retrieval in real-world conditions by higher order statistics and an alternating-least squares algorithm ». In : *Eurasip Journal on advances in signal processing* 2011.1 (nov. 2011) (cf. p. 85, 86).
- [64] H. JIANG, J. MAROT, C. FOSSATI et al. « Strongly concave star-shaped contour characterization by algebra tools ». In : *Elsevier Signal Processing* (2012) (cf. p. 81, 106, 116).
- [65] Haiping JIANG, Julien MAROT, Salah BOURENNANE et al. « Fuzzy triangle contour characterization by subspace based methods of array processing ». In : *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2010 IEEE*. IEEE, 2010, p. 165-168. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5606727 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 40, 82).
- [66] Haiping JIANG, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Fuzzy contour characterization by subspace based methods of array processing and direct method ». In : *Signal Processing Conference, 2010 18th European*. IEEE, 2010, p. 1344-1348. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7096662 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 28, 30, 41, 82).
- [67] Haiping JIANG, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Circular contour retrieval in real-world conditions by higher order statistics and an alternating-least squares algorithm ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2011.1 (2011), p. 1-15. ISSN : 1687-6180. DOI : [10.1186/1687-6180-2011-112](http://dx.doi.org/10.1186/1687-6180-2011-112). URL : <http://dx.doi.org/10.1186/1687-6180-2011-112> (cf. p. 28, 30, 37, 82, 106).

- [68] Haiping JIANG, Julien MAROT, Caroline FOSSATI et al. « Strongly concave star-shaped contour characterization by algebra tools ». en. In : *Signal Processing* 92.7 (juil. 2012), p. 1567-1579. ISSN : 01651684. DOI : [10.1016/j.sigpro.2011.10.002](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.10.002). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168411003501> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 28, 30, 37, 82).
- [69] Donald R. JONES, Cary D. PERTTUNEN et Bruce E. STUCKMAN. « Lipschitzian optimization without the Lipschitz constant ». In : *Journal of Optimization theory and Application* 79.1 (oct. 1993), p. 157-181 (cf. p. 72, 75, 77, 91).
- [70] Zdenek KALAL, Krystian MIKOLAJCZYK et Jiri MATAS. « Forward-backward error : Automatic detection of tracking failures ». In : *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*. IEEE, 2010, p. 2756-2759 (cf. p. 111).
- [71] Vikram Kumar KAMBOJ. « A novel hybrid PSO–GWO approach for unit commitment problem ». In : *Neural Computing and Applications* (2015), p. 1-13 (cf. p. 133).
- [72] Dervis KARABOGA et Bahriye BASTURK. « A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization : artificial bee colony (ABC) algorithm ». In : *Journal of Global Optimization* 39.3 (nov. 2007), p. 459-471. ISSN : 1573-2916. DOI : [10.1007/s10898-007-9149-x](https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x). URL : <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x> (cf. p. 146).
- [73] Zsolt T. KARDKOVACS, Zsombor PAROCZI, Endre VARGA et al. « Real-time traffic sign recognition system ». In : *Cognitive Infocommunications, 2011 2nd International Conference on*. IEEE, 2011, p. 1-5 (cf. p. 108).
- [74] Stephen KARUNGARU, Minoru FUKUMI, Norio AKAMATSU et al. « Automatic human faces morphing using genetic algorithms based control points selection ». In : *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 3.2 (2007), p. 1-6 (cf. p. 182).
- [75] J. KENNEDY et R. EBERHART. « Particle swarm optimization ». In : *IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth, 1995, p. 1942-1948 (cf. p. 133, 146).
- [76] J. KENNEDY et R. C. EBERHART. « A discrete binary version of the particle swarm algorithm ». In : *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*. T. 5. Oct. 1997, 4104-4108 vol.5. DOI : [10.1109/ICSMC.1997.637339](https://doi.org/10.1109/ICSMC.1997.637339) (cf. p. 133).
- [77] J.P. KERÉKES et J.E. BAUM. « Full Spectrum Spectral Imaging System Analytical Model ». In : *IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing* 43.3 (mar. 2005), p. 571-580 (cf. p. 143).

- [78] Joseph KESSEL. *Le lion*. " Gallimard, collection blanche", 1958. ISBN : 2070235815 (cf. p. 50).
- [79] William KETCHANTANG, Stéphane DERRODE, Lionel MARTIN et al. « Pearson-based mixture model for color object tracking ». In : *Machine Vision and Applications* 19.5-6 (2008), p. 457-466 (cf. p. 109).
- [80] A. KHOTANZAD et Y. H. HONG. « Invariant image recognition by Zernike moments ». In : *IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 12(5) (1990), p. 489-497 (cf. p. 115).
- [81] Won KIM et Ju-Jang LEE. « Object tracking based on the modular active shape model ». In : *Mechatronics* 15.3 (2005), p. 371-402. ISSN : 0957-4158. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2004.09.002> (cf. p. 109).
- [82] Mustafa Servet KIRAN. « TSA : Tree-seed algorithm for continuous optimization ». In : *Expert Systems with Applications* 42.19 (2015), p. 6686-6698. ISSN : 0957-4174. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.055>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417415002973> (cf. p. 146).
- [83] N. KIRYATI et A.M. BRUCKSTEIN. « What's in a set of points? [straight line fitting] ». In : *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14.4 (1992), p. 496-500 (cf. p. 67, 73).
- [84] Jeffrey C. LAGARIAS, James A. REEDS, Margaret H. WRIGHT et al. « Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions ». In : *SIAM Journal on Optimization* 9.1 (1998), p. 112-147. DOI : [10.1137/S1052623496303470](https://doi.org/10.1137/S1052623496303470) (cf. p. 75, 92).
- [85] H LANTERI, M ROCHE, O CUEVAS et al. « A general method to devise maximum-likelihood signal restoration multiplicative algorithms with non-negativity constraints ». In : *Signal Processing* 81.5 (2001), p. 945-974. ISSN : 0165-1684. DOI : [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684\(00\)00275-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684(00)00275-9). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168400002759> (cf. p. 158).
- [86] Yann LECUN, Bernhard E. BOSER, John S. DENKER et al. « Handwritten Digit Recognition with a Back-Propagation Network ». In : *Advances in Neural Information Processing Systems 2*. Sous la dir. de D. S. TOURETZKY. Morgan-Kaufmann, 1990, p. 396-404 (cf. p. 112).
- [87] Hui-Cheng LIAN et Bao-Liang LU. « Multi-view gender classification using local binary patterns and support vector machines ». In : *Advances in Neural Networks-ISNN 2006*. Springer, 2006, p. 202-209 (cf. p. 112).

- [88] Shih-Wei LIN, Kuo-Ching YING, Shih-Chieh CHEN et al. « Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines ». In : *Expert systems with applications* 35.4 (2008), p. 1817-1824 (cf. p. 180).
- [89] T. LIN et S. BOURENNANE. « Hyperspectral Image Processing by Jointly Filtering Wavelet Component Tensor ». In : *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 51.6 (2013), p. 3529-3541 (cf. p. 143, 156, 157, 160, 161).
- [90] Tao LIN, Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Small target detection improvement in hyperspectral image ». In : *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. Springer, 2013, p. 460-469. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-02895-8_41 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 31, 40, 65, 154, 156).
- [91] H. LIU, Y. GAO et C. WANG. « Gender identification in unconstrained scenarios using Self-Similarity of Gradients features ». In : *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Oct. 2014, p. 5911-5915. DOI : [10.1109/ICIP.2014.7026194](https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7026194) (cf. p. 112).
- [92] X. LIU, S. BOURENNANE et C. FOSSATI. « Nonwhite Noise Reduction in Hyperspectral Images. » In : *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 9.3 (2012), p. 368-372 (cf. p. 143).
- [93] Yujie LIU, Deng YU, Xiaoming CHEN et al. « TOP-SIFT : the selected SIFT descriptor based on dictionary learning ». In : *The Visual Computer* (2018), p. 1-11 (cf. p. 182).
- [94] Zhenyuan LIU, Zaisheng LIU, Zhipeng ZHU et al. « Simulated annealing for a multi-level nurse rostering problem in hemodialysis service ». In : *Applied Soft Computing* 64 (2018), p. 148-160. ISSN : 1568-4946. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.12.005> (cf. p. 146).
- [95] Ezequiel LÓPEZ-RUBIO, Esteban J. PALOMO et Enrique DOMÍNGUEZ. « Robust self-organization with M-estimators ». In : *Neurocomputing* 151.Part 1 (2015), p. 408-423. ISSN : 0925-2312. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.024>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231214012077> (cf. p. 158).
- [96] Chao LU, Liang GAO, Xinyu LI et al. « A hybrid multi-objective grey wolf optimizer for dynamic scheduling in a real-world welding industry ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 57 (2017), p. 61-79. ISSN : 0952-1976. DOI : <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.10.013>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197616301968> (cf. p. 134).

- [97] Chao LU, Shengqiang XIAO, Xinyu LI et al. « An effective multi-objective discrete grey wolf optimizer for a real-world scheduling problem in welding production ». In : *Advances in Engineering Software* 99 (2016), p. 161-176. ISSN : 0965-9978. DOI : <http://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.06.004>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997816301260> (cf. p. 133, 134).
- [98] J. MAROT et S. BOURENNANE. « Array processing and fast Optimization Algorithms for Distorted Circular Contour Retrieval ». In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* (2007) (cf. p. 77).
- [99] J. MAROT et S. BOURENNANE. « Propagator method for an application to contour estimation ». en. In : *Pattern Recognition Letters* 28.12 (sept. 2007), p. 1556-1562. ISSN : 01678655. DOI : [10.1016/j.patrec.2007.03.013](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.03.013). URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167865507001109> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 38, 67).
- [100] J. MAROT et S. BOURENNANE. « Subspace-Based and DIRECT Algorithms for Distorted Circular Contour Estimation ». In : *IEEE Transactions on IP* 16(9) (2007), p. 2369-2378 (cf. p. 116).
- [101] J. MAROT et S. BOURENNANE. « Array processing for intersecting circle retrieval ». In : *Signal Processing Conference, 2008 16th European*. Août 2008, p. 1-5 (cf. p. 41, 72, 82).
- [102] J. MAROT et S. BOURENNANE. « Recent advances on tensor models and their relevance for multidimensional data processing ». In : *2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Nov. 2014, p. 586-590. DOI : [10.1109/ACSSC.2014.7094513](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2014.7094513) (cf. p. 31, 40, 65, 154).
- [103] J. MAROT, Y. CAULIER, A. KULESCHOV et al. « Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems : 10th International Conference, ACIVS 2008, Juan-les-Pins, France, October 20-24, 2008. Proceedings ». In : sous la dir. de Jacques BLANC-TALON, Salah BOURENNANE, Wilfried PHILIPS et al. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. Chap. Contour Detection for Industrial Image Processing by Means of Level Set Methods, p. 655-663. ISBN : 978-3-540-88458-3. DOI : [10.1007/978-3-540-88458-3_59](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88458-3_59). URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88458-3_59 (cf. p. 30, 41, 82).
- [104] Julien MAROT. « MÉTHODES PAR SOUS-ESPACES ET D'OPTIMISATION : APPLICATION AU TRAITEMENT D'ANTENNE, A L'ANALYSE D'IMAGES, ET AU TRAITEMENT DE DONNÉES TENSORIELLES ». Thèse de doct. Institut Fresnel, 2007 (cf. p. 80).
- [105] Julien MAROT. *Additional results to ICIP'10*. <https://sites.google.com/site/icip1915julienmarotresults/>. 2010 (cf. p. 104).

- [106] Julien MAROT. « Adaptive mixed grey wolf optimizer : toolbox for illustration and comparative study ». In : *SPARS Conference, 2019*. 2019 (cf. p. 39).
- [107] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Array Processing and Fast Optimization Algorithms for Distorted Circular Contour Retrieval ». en. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2007.1 (2007), p. 057354. ISSN : 1687-6180. DOI : [10.1155/2007/57354](https://doi.org/10.1155/2007/57354). URL : <http://asp.eurasipjournals.com/content/2007/1/057354> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 38).
- [108] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Phase Distortion Estimation by DIRECT and Spline Interpolation Algorithms ». In : *IEEE Signal Processing Letters* 14.7 (juil. 2007), p. 461-464. ISSN : 1070-9908. DOI : [10.1109/LSP.2006.891317](https://doi.org/10.1109/LSP.2006.891317). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4244486> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 38).
- [109] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Subspace-Based and DIRECT Algorithms for Distorted Circular Contour Estimation ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 16.9 (sept. 2007), p. 2369-2378. ISSN : 1057-7149. DOI : [10.1109/TIP.2007.903907](https://doi.org/10.1109/TIP.2007.903907). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4286998> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 38, 70, 72).
- [110] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Subspace-based and DIRECT algorithms for distorted circular contour estimation ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 16.9 (2007), p. 2369-2378 (cf. p. 80, 83).
- [111] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Fast tensor signal filtering using fixed point algorithm ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on*. IEEE, mar. 2008, p. 921-924. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4517761 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 27, 41).
- [112] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Leaf marker spectra identification by hyperspectral image acquisition and vertex component analysis ». In : *Visual Information Processing (EUVIP), 2013 4th European Workshop on*. IEEE, 2013, p. 190-195 (cf. p. 40, 132).
- [113] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Particle swarm optimization for blurred contour retrieval ». In : *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2014 Proceedings of the 22nd European*. IEEE, 2014, p. 810-814. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6952261 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 31, 40, 132).

- [114] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems : 16th International Conference, ACIVS 2015, Catania, Italy, October 26-29, 2015. Proceedings ». In : sous la dir. de Sebastiano BATTIATO, Jacques BLANC-TALON, Giovanni GALLO et al. Cham : Springer International Publishing, 2015. Chap. Improvement of a Wavelet-Tensor Denoising Algorithm by Automatic Rank Estimation, p. 779-790. ISBN : 978-3-319-25903-1. DOI : [10.1007/978-3-319-25903-1_67](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25903-1_67). URL : http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-25903-1_67 (cf. p. 31, 39, 154, 156, 158).
- [115] Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Raspberry Pi for image processing education ». In : *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017 25th European*. IEEE, 2017, p. 2364-2366 (cf. p. 26, 39, 44, 53).
- [116] Julien MAROT, Salah BOURENNANE et Mouloud ADEL. « Array processing approach for object segmentation in images ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. ICASSP 2007. IEEE International Conference on*. T. 1. IEEE, 2007, p. I-621. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4217156 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 41).
- [117] Julien MAROT, Salah BOURENNANE et Klaus SPINNLER. « Metal surface control system based on successive contour estimation ». In : *Image Processing (ICIP), 2010 17th IEEE International Conference on*. IEEE, 2010, p. 2293-2296. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5654115 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 30, 41, 82, 103).
- [118] Julien MAROT, Caroline FOSSATI et Salah BOURENNANE. « About Advances in Tensor Data Denoising Methods ». en. In : *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2008 (2008), p. 1-13. ISSN : 1687-6172, 1687-6180. DOI : [10.1155/2008/235357](https://doi.org/10.1155/2008/235357). URL : <http://www.hindawi.com/journals/asp/2008/235357.html> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 27, 31, 38, 65, 154, 159).
- [119] Julien MAROT, Caroline FOSSATI et Salah BOURENNANE. « Fast subspace-based source localization methods ». In : *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop, 2008. SAM 2008. 5th IEEE*. IEEE, 2008, p. 203-206. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4606855 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 41).
- [120] Julien MAROT, Caroline FOSSATI et Salah BOURENNANE. « Fast subspace-based tensor data filtering ». In : *Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on*. IEEE, 2009, p. 3869-3872. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5414048 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 41).
- [121] Julien MAROT, Caroline FOSSATI et Y CAULIER. « About array processing methods for image segmentation ». In : *Recent Advances in Signal Processing*. InTech, 2009 (cf. p. 42).

- [122] Benoit MARTIN, Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Real-time face detection and tracking for vending machine data management ». In : *GRETSI 2017*. 2017 (cf. p. 29, 31, 39, 107, 181).
- [123] Benoit MARTIN, Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Reconnaissance de genre optimisée par GWO adaptatif ». In : *GRETSI 2017*. 2017 (cf. p. 29, 31, 39, 107).
- [124] Benoit MARTIN, Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Improved Discrete Grey Wolf Optimizer ». In : *Signal Processing Conference, 2018 26th European*. IEEE, 2018, p. 499-503. ISBN : 978-90-827970-1-5 (cf. p. 29, 31, 39, 132).
- [125] Benoit MARTIN, Julien MAROT et Salah BOURENNANE. « Mixed grey wolf optimizer for the joint denoising and unmixing of multispectral images ». In : *Applied Soft Computing* 74 (2019), p. 385-410. ISSN : 1568-4946. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.019>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494618305763> (cf. p. 29, 31, 37, 132, 133, 179, 180).
- [126] J.M. MENDEL. « Tutorial on Higher Order Statistics (Spectra) in signal processing and system theory : theoretical results and some applications ». In : *Proc. of the IEEE*. T. 79. 3. Mar. 1991, p. 278-305 (cf. p. 155).
- [127] Claire MIGLIACCIO, Laurent BROCHIER, Jérôme LANTÉRI et al. « MMW Imaging using polarimetric measurements ». In : *EUMV Conference, 2019*. IEEE, 2019 (cf. p. 39, 176, 177).
- [128] Seyedali MIRJALILI et Amir H. GANDOMI. « Chaotic gravitational constants for the gravitational search algorithm ». In : *Applied Soft Computing* 53 (2017), p. 407-419. ISSN : 1568-4946. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.008>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494617300121> (cf. p. 176).
- [129] Seyedali MIRJALILI, Seyed Mohammad MIRJALILI et Andrew LEWIS. « Grey Wolf Optimizer ». In : *Advances in Engineering Software* 69 (2014), p. 46-61. ISSN : 0965-9978. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997813001853> (cf. p. 133, 156).
- [130] Ian M MITCHELL. « The flexible, extensible and efficient toolbox of level set methods ». In : *Journal of Scientific Computing* 35.2-3 (2008), p. 300-329 (cf. p. 102).
- [131] Nitin MITTAL, Urvinder SINGH et Balwinder SINGH SOHI. « Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization ». In : *Applied Computational Intelligence and Soft Computing* Article ID 7950348 (2016), 16 pages. DOI : <doi:10.1155/2016/7950348> (cf. p. 133, 146).

- [132] Michael G MORROW, Cameron HG WRIGHT et Thad B WELCH. « Real-time DSP for adaptive filters : A teaching opportunity ». In : *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE. 2013, p. 4335-4338 (cf. p. 54).
- [133] Damien MUTI, Salah BOURENNANE et Julien MAROT. « Lower-Rank Tensor Approximation and Multiway Filtering ». en. In : *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications* 30.3 (jan. 2008), p. 1172-1204. ISSN : 0895-4798, 1095-7162. DOI : [10.1137/060653263](https://doi.org/10.1137/060653263). URL : <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/060653263> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 27, 31, 38, 65, 154-156, 158, 159).
- [134] José MP NASCIMENTO et José MB DIAS. « Vertex component analysis : A fast algorithm to unmix hyperspectral data ». In : *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43.4 (2005), p. 898-910 (cf. p. 144).
- [135] Ramesh NEELAMANI, Hyeokho CHOI et Richard BARANIUK. « ForWaRD : Fourier-wavelet regularized deconvolution for ill-conditioned systems ». In : *IEEE Transactions on signal processing* 52.2 (2004), p. 418-433 (cf. p. 100).
- [136] F. NSENGIYUMVA, C. MIGLIACCIO, L. BROCHIER et al. « NewW-Band Scattering Measurement System : Proof of Concept and Results for 2-D Objects ». In : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 66.12 (déc. 2018), p. 7224-7236. ISSN : 0018-926X. DOI : [10.1109/TAP.2018.2870429](https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2870429) (cf. p. 176).
- [137] OCDE. www.oecd.org/pisa/keyfindings/PISA-2012-students-computers-france-eng.pdf. 2012 (cf. p. 53).
- [138] OECD. *Students, Computers and Learning : Making the Connection*. PISA, OECD Publishing, Paris, 2015 (cf. p. 53).
- [139] « OpenCV : Open-source Computer Vision Library ». In : (). URL : <http://opencv.org/> (visité le 13/04/2016) (cf. p. 54, 120).
- [140] Mahesh PAL et Giles M. FOODY. « Feature Selection for Classification of Hyperspectral Data by SVM ». In : *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48.5 (mai 2010), p. 2297-2307 (cf. p. 112, 114).
- [141] L. PARRA, C. SPENCE, P. SAJDA et al. « Unmixing hyperspectral data ». In : *Advances in Neural Information Processing Systems* 12 (2000), p. 942-948 (cf. p. 156).
- [142] V Paul PAUCA, Jon PIPER et Robert J PLEMMONS. « Nonnegative matrix factorization for spectral data analysis ». In : *Linear algebra and its applications* 416.1 (2006), p. 29-47 (cf. p. 144).
- [143] E. PERSON et K. S. FU. « Shape discrimination using Fourier descriptors ». In : *IEEE trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1986), p. 388-397 (cf. p. 115).

- [144] P Jonathon PHILLIPS, Hyeonjoon MOON, Syed A RIZVI et al. « The FERET evaluation methodology for face-recognition algorithms ». In : *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 22.10 (2000), p. 1090-1104 (cf. p. 112).
- [145] William T REEVES. « Particle systems, a technique for modeling a class of fuzzy objects ». In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 2.2 (1983), p. 91-108 (cf. p. 133).
- [146] N. RENARD, S. BOURENNANE et J. BLANC-TALON. « Denoising and dimensionality reduction using multilinear tools for hyperspectral images ». In : *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 5.2 (2008), p. 138-142 (cf. p. 156, 158).
- [147] F. S. SAMARIA et A. C. HARTE. « Parameterisation of a stochastic model for human face identification ». In : *Proceedings of 1994 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*. Déc. 1994, p. 138-142. DOI : [10.1109/ACV.1994.341300](https://doi.org/10.1109/ACV.1994.341300) (cf. p. 112).
- [148] Vito SANTARCANGELO, Giovanni Maria FARINELLA et Sebastiano BATTIATO. « Gender recognition : Methods, datasets and results ». In : IEEE, juin 2015, p. 1-6. ISBN : 978-1-4799-7079-7. DOI : [10.1109/ICMEW.2015.7169756](https://doi.org/10.1109/ICMEW.2015.7169756) (cf. p. 112).
- [149] R. O. SCHMIDT. « Multiple emitter location and signal parameter estimation ». In : *IEEE Trans. Antennas and Propag* (1986), p. 276-280 (cf. p. 87, 88).
- [150] Comité national de la recherche SCIENTIFIQUE. « Rapport de conjoncture 2014 ». In : sous la dir. de CNRS ÉDITIONS. 2015. Chap. Section 07 - Sciences de l'information : traitements, systèmes intégrés matériel - logiciel, robots, commandes, images, contenus, interactions, signaux et langues. ISBN : 978-2-271-08613-6 (cf. p. 172, 182).
- [151] J. SHEINVALD et N. KIRYATI. « On the Magic of SLIDE ». In : *Machine Vision and Applications* 9 (1997), p. 251-261 (cf. p. 68).
- [152] X. SHU et Xi.-J. WU. « A novel contour descriptor for 2D shape matching and its application to image retrieval ». In : *Image and Vision Computing* 29 (2011), p. 286-294 (cf. p. 115, 116).
- [153] Inc. SIGHT MACHINE. *Simple Computer Vision (Simple CV Python)*. <http://simplecv.org>. 2018 (cf. p. 54).
- [154] Prashant SRIVASTAVA et Ashish KHARE. « Content-based image retrieval using multiresolution speeded-up robust feature ». In : *International Journal of Computational Vision and Robotics* 8.4 (2018), p. 375-387 (cf. p. 182).

- [155] R. THOM. « Topological models in biology ». In : *Topology* 8.3 (1969), p. 313-335. ISSN : 0040-9383. DOI : [10.1016/0040-9383\(69\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0040-9383(69)90018-4) (cf. p. 176).
- [156] D.W. TUFTS et R. KUMARESAN. « Estimation of frequencies of multiple sinusoids : making linear prediction perform like maximum likelihood ». In : *Proc. IEEE* 70 (1982), p. 975-989 (cf. p. 69).
- [157] Matthew TURK et Alex PENTLAND. « Eigenfaces for Recognition ». In : *J. Cognitive Neuroscience* 3.1 (jan. 1991), p. 71-86. ISSN : 0898-929X. DOI : [10.1162/jocn.1991.3.1.71](https://doi.org/10.1162/jocn.1991.3.1.71) (cf. p. 112).
- [158] Vladimir N. VAPNIK. *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York : Springer-Verlag, 1995 (cf. p. 112, 114).
- [159] P. VIOLA et M. JONES. « Rapid object detection using a boosted cascade of simple features ». In : *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*. T. 1. 2001, p. 511-518. DOI : [10.1109/CVPR.2001.990517](https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517) (cf. p. 107).
- [160] Paul VIOLA et Michael J. JONES. « Robust Real-Time Face Detection ». In : *International Journal of Computer Vision* 57.2 (2004), p. 137-154 (cf. p. 108, 181).
- [161] M. WAX et T. KAILATH. « Detection of signals by information theoretic criteria ». In : *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Process* 33.2 (1985), p. 387-392 (cf. p. 96, 155, 157).
- [162] Yongkang WONG, Shaokang CHEN, Sandra MAU et al. « Patch-based Probabilistic Image Quality Assessment for Face Selection and Improved Video-based Face Recognition ». In : *IEEE Biometrics Workshop, Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*. IEEE, juin 2011, p. 81-88 (cf. p. 123).
- [163] Cameron HG WRIGHT, Thad B WELCH et WJ GOMES. « Teaching DSP concepts using MATLAB and the TMS320C31 DSK ». In : *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1999. Proceedings., 1999 IEEE International Conference on*. T. 6. IEEE. 1999, p. 3573-3576 (cf. p. 54).
- [164] Y. XIANG, A. ALAHI et S. SAVARESE. « Learning to Track : Online Multi-object Tracking by Decision Making ». In : *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Déc. 2015, p. 4705-4713. DOI : [10.1109/ICCV.2015.534](https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.534) (cf. p. 109).
- [165] Chenyang XU et Jerry L PRINCE. « Snakes, shapes, and gradient vector flow ». In : *IEEE Transactions on image processing* 7.3 (1998), p. 359-369 (cf. p. 78).
- [166] N. YUEN et B. FRIEDLANDER. « Asymptotic performance analysis of blind signal copy using fourth order cumulant ». In : *International Jour. Adaptive Contr. Singnal Proc.* 48 (mar. 1996), p. 239-265 (cf. p. 155).

- [167] N. YUEN et B. FRIEDLANDER. « DOA in multipath : an approach using fourth order cumulant ». In : *IEEE Trans. on Signal Processing* 45.5 (1997), p. 1253-63 (cf. p. 155).
- [168] Cha ZHANG et Zhengyou ZHANG. *A survey of recent advances in face detection*. Technical report, Microsoft Research, 2010 (cf. p. 107).
- [169] Xin ZHANG, Gui-Song XIA, Qikai LU et al. « Visual object tracking by correlation filters and online learning ». In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 140 (2018), p. 77-89. ISSN : 0924-2716. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.009> (cf. p. 109).
- [170] Shihua ZHOU, Yiming LI, Zhaohui REN et al. « Nonlinear dynamic analysis of a unilateral vibration vehicle system with structural nonlinearity under harmonic excitation ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 116 (2019), p. 751-771. ISSN : 0888-3270. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.07.021> (cf. p. 176).
- [171] A. ZIDI, J. MAROT, S. BOURENNANE et al. « Automatic rank estimation of Parafac decomposition and application to multispectral image wavelet denoising ». In : *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Sept. 2016, p. 3101-3105. DOI : [10.1109/ICIP.2016.7532930](https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7532930) (cf. p. 28, 31, 39, 154).
- [172] Abir ZIDI, Josselin JUAN, Julien MAROT et al. « Nonnegative matrix factorization with spatial prior and reference spectra application to remote hyperspectral image understanding ». In : *Visual Information Processing (EUVIP), 2014 5th European Workshop on*. IEEE, 2014, p. 1-6. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7018397 (visité le 15/04/2016) (cf. p. 40, 132, 174).
- [173] Abir ZIDI, Julien MAROT, Salah BOURENNANE et al. « Bio-Inspired Optimization Algorithms for Automatic Estimation of Multiple Subspace Dimensions in a Tensor-Wavelet Denoising Algorithm ». en. In : *Journal of Remote Sensing Technology* 4.1 (déc. 2016), p. 90-114. DOI : [10.18005/JRST0401008](https://doi.org/10.18005/JRST0401008) (cf. p. 28, 31, 37, 154, 171).
- [174] Abir ZIDI, Julien MAROT, Klaus SPINNLER et al. « Unmixing of Hyperspectral Images with Pure Prior Spectral Pixels ». In : *SCITEPRESS - Science*, 2015, p. 153-158. ISBN : 978-989-758-089-5 978-989-758-090-1 978-989-758-091-8. DOI : [10.5220/0005311101530158](https://doi.org/10.5220/0005311101530158). URL : <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0005311101530158> (visité le 15/04/2016) (cf. p. 40, 132).
- [175] Abir ZIDI, Klaus SPINNLER, Julien MAROT et al. « Multispectral image denoising in wavelet domain with unsupervised tensor subspace-based method ». In : *Visual Information Processing (EUVIP), 2016 6th European Workshop on*. IEEE. 2016, p. 1-6 (cf. p. 31, 39, 154).