



Orientation de filières émergentes en détection infrarouge

Isabelle Ribet-Mohamed

► To cite this version:

Isabelle Ribet-Mohamed. Orientation de filières émergentes en détection infrarouge. Optique / photonique. UNIVERSITE PARIS SUD, 2016. <tel-01321244>

HAL Id: tel-01321244

<https://hal.science/tel-01321244v1>

Submitted on 25 May 2016

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

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



HAL Authorization

UNIVERSITE PARIS-SUD

Laboratoire : ONERA

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : PHYSIQUE

par

Isabelle RIBET

Orientation de filières émergentes en détection infrarouge

Soutenue le 29/03/2016 à l'Université Paris-Sud

Rapporteurs :

M. Pierre CHAVEL, Institut d'Optique

M. Pierre-Olivier LAGAGE, CEA

M. Carlo SIRTORI, Université Paris Diderot-Paris7

Examineurs :

M. Yann BOUCHER, ENIB

M. Philippe CHRISTOL, Université de Montpellier

M. Riad HAÏDAR, ONERA - Polytechnique

Invités :

M. Philippe BENSUSSAN, SOFRADIR

M. Joël DESCHAMPS, ONERA

M. Jean-Christophe PEYRARD, DGA

A Sarah, Alana, Olivia et Ajmal

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je remercie Pierre Chavel, Pierre-Olivier Lagage et Carlo Sirtori d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire d'HDR. Chacun de vous a apporté, par sa thématique de recherche, un éclairage particulier. J'associe à ces remerciements les autres membres de mon jury : Yann Boucher, Philippe Christol, Riad Haïdar, Philippe Bensussan, Joël Deschamps et Jean-Christophe Peyrard. C'est un honneur pour moi que vous ayez accepté d'évaluer mon travail et je vous suis reconnaissante pour le temps que vous avez consacré à la lecture et à l'analyse de ce manuscrit.

Mes remerciements vont ensuite aux doctorants et post-doctorants que j'ai encadrés ou co-encadrés : le travail présenté dans ce manuscrit est avant tout le vôtre ! Un immense merci, donc, à Judikaël Le Rouzo, dont les phrases cultes ponctuent encore, dix ans après, les discussions du Labo Détecteurs. A Emmanuel Lhuillier, à qui il faut plus d'un hamiltonien pour être effrayé. A Katarzyna, avec qui je continue à parler anglais même si elle s'exprime désormais parfaitement en français - juste pour me rappeler le bon vieux temps où nous travaillions ensemble. A Cyril Cervera et Rachid Taalat : ma contribution à leurs travaux de thèse a été très modeste puisqu'ils ont effectué le plus clair de leur recherche à l'IES et qu'ils étaient déjà diablement bien encadrés là-bas par Philippe Christol et Jean-Baptiste Rodriguez. J'éprouve un réel plaisir (et aussi un soupçon de fierté) à retrouver Cyril et Rachid comme collègues dans le cadre des collaborations que nous avons avec le CEA/LETI et Sofradir. A Edouard Giard, dont le nom rimera toujours avec « D star » au Labo Détecteurs. Ils ont bien de la chance, à l'IRAP, de t'avoir recruté ! A Jean Nghiem-Xuan, dernière de mes victimes en date, dont la bonne humeur est déjà légendaire au Labo Détecteurs.

Je remercie Franck Lefèvre et Antoine Roblin de m'avoir permis de réaliser mon travail de recherche au Département Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA. Au cours de ces quatorze années, j'ai eu l'occasion de travailler avec bon nombre de personnes remarquables. Je ne peux pas toutes les nommer ici, mais je souhaite adresser un « merci » particulier à : Riad Haïdar, responsable de l'unité Concepts Innovants en Optique (CIO), pour son enthousiasme communicatif et ses propositions toujours stimulantes ; Sylvie Bernhardt, avec qui je partage mes joies et mes soucis du quotidien depuis 20 ans déjà ; Marcel Caës, qui aborde le jardinage avec la même rigueur scientifique que la caractérisation des détecteurs infrarouge (gageons qu'il n'y aura pas de crosstalk entre la parcelle des tomates et celle des salades) ; Sophie Derelle, chercheuse hors pair sur qui on peut toujours compter ; Marc Jacquart, qui peut porter une combinaison fluo moulante sans que qui que ce soit se moque de lui (trop peur des représailles !) ; Sylvain Rommeluère, virtuose de la spectro

infrarouge par transformée de Fourier; Michel Tauvy, grand spécialiste des électroniques de proximité (l'unité « Tauvy » rejoindra sous peu le système international d'unités, c'est sûr!) et consultant en immobilier à ses heures perdues; les trois « PBS girls » : Sabine Suffis-Carretero, Sophie Thétas et Cindy Bellanger, ainsi qu'Alain Kattnig, Gregory Vincent, Julien Jaëck, Patrick Bouchon, Eric Lambert et Gilles Le Coadou. Sans oublier les collègues de l'unité ERIO, avec qui j'ai eu plaisir à travailler : Pierre Simoneau, Didier Henry, Christophe Coudrain, Nicolas Guérineau, Guillaume Druart, Florence de la Barrière, Stéphane Langlois, Philippe Perrault, Matthieu Chambon, Roland Domel, Rémi Gouyon et Laurent Rousset-Rouvière. Enfin, pour leur aide et leur infinie patience face à ma capacité à inventer des situations administratives compliquées, je remercie Brigitte Commelin, Corinne Andrieux, Christèle Carette et Myriam Plante, sans oublier Véronique Bentadj-Paris, Valérie Delrue ni Philippe Roze, partis vers d'autres horizons.

En parallèle de mes activités de recherche, j'ai eu la chance de pouvoir mettre en place différentes actions d'enseignement, dont l'aboutissement a été un poste d'enseignant associé à l'IIOGS qui est pour moi l'occasion de réaliser un double rêve : d'une part, enseigner (beaucoup!), et d'autre part, « revenir aux sources » à l'IIOGS. Un immense merci, donc, à Caroline Kulcsár qui a tant œuvré pour que cela soit possible et dont j'apprécie beaucoup l'inépuisable énergie. Ma reconnaissance s'adresse également à Emilie Ericher, qui veille au bon déroulement de nos stages de formation continue, ainsi qu'à la « dream team » du Lense : Fabienne Bernard, Lionel Jacobowicz, Thierry Avignon, Cédric Lejeune... Quel plaisir de venir enseigner en TP grâce à vous! Une pensée également pour les enseignants avec qui j'ai passé de très bons moments en TP : François Marquier, Yvan Sortais, Matthieu Boffety, Karen Perronet, Rosa Tualle-Brouiri, Julien Villemejanne, Sébastien de Rossi, Nicolas Dubreuil (et pardon à tous ceux que j'oublie!).

La rédaction de ce manuscrit aura été l'occasion de faire le bilan d'une longue tranche de vie professionnelle. Il ressort de cette phase de réflexion le nom de quatre personnes qui ont eu une influence décisive sur ma carrière, chacune à sa façon, et je souhaite les en remercier vivement : Jérôme Primot est le premier à m'avoir fait confiance, puisqu'il m'a embauchée à l'ONERA. Il a depuis passé des centaines d'heures à m'expliquer la quintessence de la FTM ou encore comment dimensionner un système optronique. Un jour, peut-être, trouverai-je une question à laquelle il ne sait pas répondre? Vient ensuite Joël Deschamps, qui a structuré le Labo Détecteurs et en a fait ce qu'il est aujourd'hui. Je n'exagère pas en disant qu'il m'a tout appris de la détection infrarouge, ni qu'il m'apporte encore aujourd'hui un soutien quotidien. Discuter cinq minutes avec lui permet toujours de prendre un recul considérable sur les choses, notamment sur les figures de mérite telles que le D^* (ou sur la couleur de mon dernier foulard). Vient ensuite Philippe Christol (et derrière lui toute l'équipe de l'IES, notamment Jean-Baptiste Rodriguez et Jean-Philippe Pérez). Cela fait dix ans déjà que nous collaborons. Ce manuscrit retrace l'essentiel des

résultats scientifiques issus de nos travaux. Ce qui n'apparaît pas, mais que je souhaite souligner ici, est que d'un point de vue humain cette collaboration est un réel bonheur : Philippe, mille mercis ! Enfin, je souhaite remercier tout particulièrement Jean-Louis Meyzonnette, auprès de qui j'ai tant appris pendant les deux années où nous nous sommes côtoyés comme enseignants de formation continue, avant d'essayer humblement de le remplacer sur ses cours liés aux systèmes optroniques.

En dernier lieu dans cette longue liste de remerciements, mais en première position dans mes pensées, je tiens à remercier ma famille : mes parents, qui m'ont transmis leur passion pour l'enseignement et qui m'ont toujours soutenue et encouragée ; David et Amélie, qui ont montré qu'une montagne de délicieux petits fours permet d'abolir les frontières entre physiciens et biologistes ; Ajmal, sans le soutien de qui rien de tout cela n'aurait été possible ; et enfin, nos trois filles Sarah, Alana et Olivia, qui après avoir tant entendu parlé de cette fameuse HDR sans bien comprendre en quoi cela consistait, ont finalement décrété après la soutenance que c'était « génial » (il n'est pas exclu que la table de ping-pong et le babyfoot du foyer des élèves aient contribué à leur enthousiasme).

ACRONYMES

AFRL Air Force Research Laboratory (USA)
AIQUIDO Analyse, Interprétation, Qualification et Intégration de Détecteurs Optiques (Laboratoire)
BLIP Background Limited Infrared Performances
CEA / LETI Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives / Laboratoire d’Electronique des Technologies de l’Information
CHTM Center for High Technology Materials (université du Nouveau Mexique, USA)
CQD Center for Quantum Devices (université de l’Illinois, USA)
CSIG Continuously Self Imaging Grating (réseau continu auto-imageant)
DOTA / CIO Département Optique Théorique et Appliquée / unité Concepts Innovants en Optique
FOCUS FOCal plane arrays for Universe Sensing (Labex)
FOV Field Of View = Champ de Vue
FPA Focal Plane Array (matrice de détecteurs)
FTM Fonction de Transfert de Modulation
HgCdTe Tellure de Mercure - Cadmium
HOT High Operating Temperature
IES Institut d’Electronique et des Systèmes (université de Montpellier)
InSb Antimoniure d’indium
IOGS Institut d’Optique Graduate School
LPN Laboratoire de Photonique et de Nanostructures
LWIR LongWave InfraRed (8 – 12 μ m)
MC mono-couche atomique (monolayer)
MPQ MultiPuits Quantiques
MWIR MidWave InfraRed (3 – 5 μ m)
NETD Noise Equivalent Temperature Difference
OPO Oscillateur Paramétrique Optique
SCD SemiConductor Devices
Sofradir SOciété FRAnçaise de Détecteurs InfraRouge
VLWIR Very LongWave InfraRed (> 12 μ m)

Table des Matières

1	INTRODUCTION	1
2	CONTEXTE	3
2.1	Pourquoi y a-t-il besoin d'orienter les filières émergentes ? .	3
2.2	Concrètement, en quoi cela consiste-t-il ?	7
2.3	De quoi a-t-on besoin ?	7
2.4	Implication personnelle	8
3	DEVELOPPEMENT DES OUTILS NECESSAIRES A L'ORIENTATION DES FILIERES EMERGENTES	11
3.1	Développement de bancs de tests innovants	12
3.1.1	Banc de mesure de réponse spectrale hors bande . .	12
3.1.2	Banc de mesure de réponse angulaire	14
3.1.3	Banc de mesure de réponse sous flux	17
3.1.4	Banc de mesure de bruit	20
3.1.5	Banc de mesure de temps de vie	21
3.1.6	Prochains challenges au laboratoire AIQUIDO	23
3.2	Mise en place de modèles pour comprendre la physique de la détection	24
3.2.1	Modélisation du couplage optique dans les détecteurs à multipuits quantiques	25
3.2.2	Modélisation du transport électronique dans les détecteurs à multipuits quantiques	26
3.2.3	Modélisation des performances d'un instrument infra- rouge	29
4	EXEMPLE CONCRET D'ORIENTATION DE FILIÈRE ÉMERGENTE : LA FILIÈRE SUPER-RÉSEAU	35
4.1	Démarche mise en place	35
4.2	Focus sur les actions les plus marquantes	38
4.2.1	Thèse de Cyril Cervera : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs à super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure symétrique	38
4.2.2	Post-doc de Katarzyna Jaworowicz : Mesures de courant d'obscurité et premières mesures de bruit sur détecteurs à super-réseau	39
4.2.3	Thèse de Rachid Taalat : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée	40

4.2.4	Thèses de Marie Delmas, d'Edouard Giard et de Julien Imbert : réalisation, caractérisation et modélisation de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée	44
4.3	Conclusion sur le potentiel de la filière super-réseau InAs/GaSb pour le domaine MWIR en 2015	50
4.4	Projet	57
5	ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT	61
5.1	Interventions dans les écoles et les lycées	63
5.2	Enseignement à Polytech Paris Sud	63
5.3	Enseignement à l'IOGS	63
5.4	Enseignement dans le cadre du Labex FOCUS	64
6	CONCLUSION	67
7	RÉFÉRENCES DE L'AUTEUR	69
7.1	Articles publiés dans des revues à comité de lecture	69
7.2	Revue « grand public »	71
7.3	Communications à des conférences internationales	71
7.4	Rapports internes (non classifiés)	74
7.5	Thèses partiellement encadrées / dirigées	75
7.6	Post-doc encadré	76
7.7	Stages encadrés	76
	Bibliographie	77

INTRODUCTION

L'orientation des filières émergentes en détection infrarouge est un vaste sujet qui a occupé l'essentiel de mes activités de recherche depuis 2001, date à laquelle j'ai rejoint l'unité Concepts Innovants en Optique (CIO) du Département Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA.

Cette mission d'orientation de filières est très complète et va bien au-delà d'une simple mesure de performances électro-optiques sur des détecteurs infrarouges. Il faut en effet :

- déterminer quelles sont les figures de mérite pertinentes à mesurer, qui dépendent de la filière considérée et des applications visées
- mettre en place les moyens expérimentaux permettant de réaliser ces mesures
- réaliser les mesures proprement dites et analyser les résultats obtenus
- développer les outils de modélisation nécessaires à la compréhension de la physique de la détection et à la prédiction des performances de la filière considérée
- proposer des structures optimisées pour la gamme d'applications visées
- mettre en place les levées de points durs nécessaires pour amener la filière à maturité technologique
- réaliser une intercomparaison entre les différentes filières infrarouges (filières bien établies et filières émergentes, françaises ou étrangères)

Ce travail nécessite de faire le lien entre, d'un côté, le monde des technologues (laboratoires académiques ou étatiques, industriels) et celui des applications (industriels, opérationnels et donneurs d'ordres).

Ce mémoire présente l'essentiel de mes travaux de recherche sur l'orientation des filières émergentes en détection infrarouge. Après une brève présentation du contexte, je présente les outils que j'ai contribué à développer au travers des travaux de thèse ou de post-doc que j'ai encadrés : en l'occurrence, cinq bancs de tests et trois modèles. Je prends ensuite l'exemple concret de la filière super-réseaux, dont je pilote l'orientation à l'ONERA depuis dix ans maintenant. Cette mission m'a permis de mettre en place une démarche scientifique sur le long terme, qui s'articule autour de la collaboration nouée avec l'Institut d'Electronique et des systèmes (IES) de l'université de Montpellier. Les résultats obtenus me permettent de conclure sur le potentiel de cette filière émergente dans la bande spectrale 3 – 5 μm et de définir de nouveaux axes de recherche pour les années à venir.

Je termine ce mémoire par la description des activités d'enseignement que j'ai menées en parallèle de mon travail de recherche, elles aussi centrées sur la détection infrarouge.

Sommaire

2.1	Pourquoi y a-t-il besoin d'orienter les filières émergentes ?	3
2.2	Concrètement, en quoi cela consiste-t-il ?	7
2.3	De quoi a-t-on besoin ?	7
2.4	Implication personnelle	8

2.1 POURQUOI Y A-T-IL BESOIN D'ORIENTER LES FILIÈRES ÉMERGENTES ?

Dans le domaine du visible, il existe peu de filières de détection. En effet, le matériau roi pour fabriquer des détecteurs visibles, qu'ils soient CCD ou CMOS, est le silicium. Dans le domaine de l'infrarouge, il existe au contraire de nombreuses filières de détecteurs disponibles commercialement. Les principes de détection sont variés (détecteurs quantiques ou détecteurs thermiques), de même que les matériaux utilisés (par exemple, pour les détecteurs quantiques : InGaAs, InSb, InAsSb, HgCdTe, GaAs/AlGaAs, InAs/GaSb... c'est d'ailleurs généralement le matériau absorbant qui donne son nom à la filière). Les détecteurs ainsi obtenus diffèrent par leur format, leur taille pixel, leur bande spectrale, leur mise en œuvre (refroidissement éventuel, besoin en corrections dans le temps...), et, bien sûr, par leurs performances. La [Figure 2.1](#) présente les principales filières infrarouge identifiées en 2015. La [Figure 2.2](#) et la [Figure 2.3](#) synthétisent les formats/tailles pixels accessibles et les températures de fonctionnement typiques de ces différentes filières.

Malgré la grande variété de produits sur étagère, il subsiste des besoins non couverts, pour des applications civiles ou militaires. Cela explique l'apparition régulière de filières émergentes en matière de détection infrarouge. Celles-ci peuvent reposer sur un nouveau matériau absorbant, comme les détecteurs à multipuits quantiques (MPQ) dans les années 90 ou les détecteurs InAsSb plus récemment. Elles peuvent au contraire faire suite à une rupture technologique obtenue sur une filière existante (changement de structure ou de technique de croissance par exemple). Dans tous les cas, atteindre le plein potentiel d'une filière émergente nécessite une phase d'optimisation longue et coûteuse, qui ne peut pas être entreprise systématiquement. Il faut donc sélectionner, parmi les multiples filières émergentes, celles qui sont potentiellement intéressantes, et, pour ces filières « élues », mettre en place les actions nécessaires pour les amener à maturité technologique. C'est ce que nous appellerons « orienter une filière émergente ». Une des missions de l'ONERA est justement de réaliser l'ensemble du travail nécessaire à l'orientation des filières émergentes par la DGA.

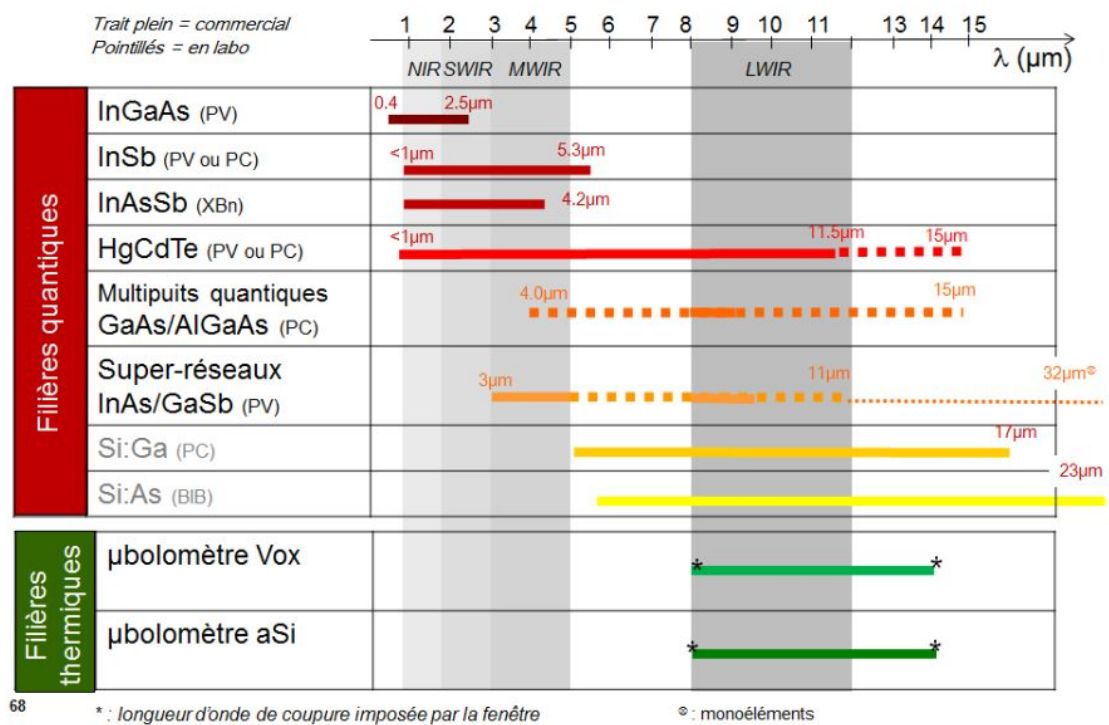


FIGURE 2.1 – Principales filières pour la détection infrarouge en 2015. PV = photovoltaïque ; PC = photoconducteur ; BIB = bande d'impuretés bloquante ; XBn = structure à barrière bloquante.

	Filière	Bande spectrale	Format max	Taille pixel associée
Filières quantiques	InGaAs	SWIR	1kx1k	15µm
	InSb	MWIR	2kx1,5k	12, 15 ou 20µm
	InAsSb	MWIR	1kx1k	15µm
	HgCdTe	SWIR	4kx4k	10µm
		MWIR	4kx4k	15µm
		LWIR	1kx1k	18µm
		Dual MW/LW	TV	20µm
	Multipuits quantiques	LWIR	1kx1k	20µm
		Dual MW/LW	TV/4	40µm
	Super-réseaux InAs/GaSb	LWIR	1kx1k	20µm
		Dual MW/MW	TV/4	40µm
Filières thermiques	µbolo Vox	LWIR	2kx1k	12µm
	µbolo αSi	LWIR	1kx1k	17µm

FIGURE 2.2 – Format de matrices et tailles pixels disponibles en 2015 pour les différentes filières infrarouge (composants commerciaux). On appelle « Format 1k × 1k » les formats du type 1024 × 1024 pixels (1280 × 768...), « Format TV » les formats du type 640 × 480 pixels (640 × 512...) et TV/4 les formats du type 320 × 240 pixels (320 × 256, 384 × 288...).

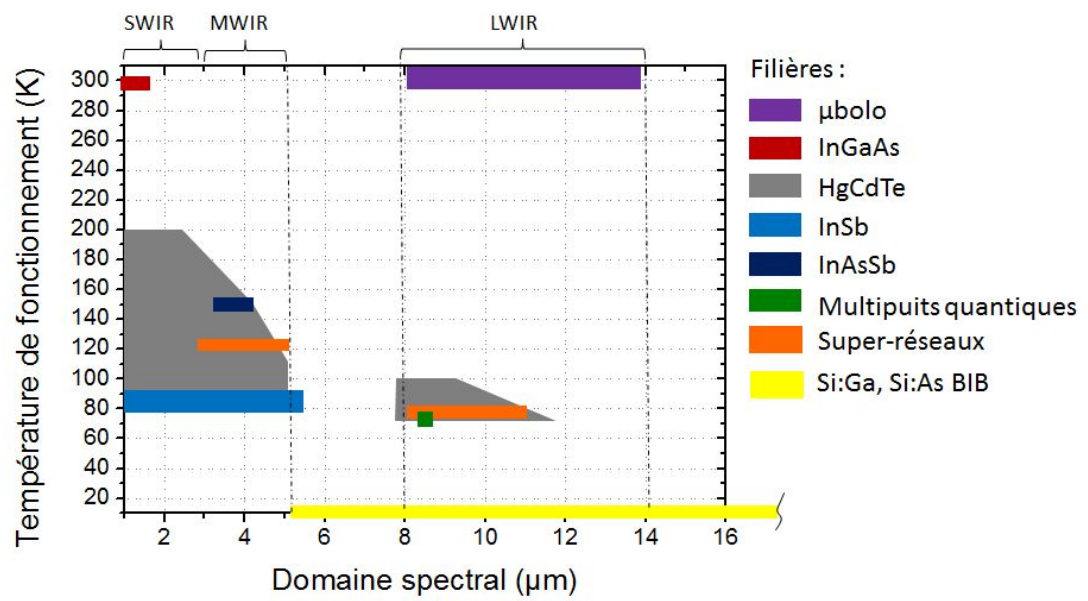


FIGURE 2.3 – Gammes spectrales accessibles et températures de fonctionnement associées pour les différentes filières de détection infrarouge.

2.2 CONCRÈTEMENT, EN QUOI CELA CONSISTE-T-IL ?

L'orientation des filières émergentes commence par un travail de bibliographie intensif, afin de repérer le plus tôt possible les nouveaux matériaux ou les nouvelles structures pouvant mener à une nouvelle filière. Des échanges avec les équipes concernées (généralement des laboratoires académiques à ce stade de la démarche) permettent une première appréhension des difficultés inhérentes à la filière émergente considérée. Mais seule la mise en place d'une vraie collaboration permet d'évaluer quelles sont, à l'instant considéré, les performances de la filière émergente. Cela passe par la réalisation de mesures électro-optiques sur des détecteurs sous forme de mono-éléments (pixels seuls, sans circuit de lecture associé), voire éventuellement sur de petites matrices.

Au vu de ces performances préliminaires, on peut identifier les applications pour lesquelles cette filière pourrait être intéressante, et déterminer de combien les performances devraient être améliorées pour répondre au besoin non couvert.

Cela permet d'identifier les points durs à lever, que l'on peut classer en deux catégories. Les points durs d'origine technologique (par exemple : difficultés liées à la gravure ou à la passivation) et les points durs fondamentaux (liés à un effet physique ou à une propriété intrinsèque d'un matériau).

La prédiction des performances potentiellement accessibles après optimisation de la filière, et l'estimation des coûts associés (en temps et en moyens humains et technologiques) permet de déterminer s'il est judicieux de se lancer dans la phase d'optimisation de la filière considérée. La décision est généralement prise par la DGA, sur la base des conclusions émises par l'ONERA.

Si le feu vert est donné, on peut alors passer à la phase d'optimisation proprement dite, en réunissant un consortium associant des laboratoires académiques, des laboratoires étatiques (comme l'ONERA ou le CEA/LETI) et des industriels. Une des premières étapes est la définition d'un plan de travail permettant de lever les points durs les uns après les autres. Si l'un de ces points durs s'avère impossible (ou trop coûteux) à lever, l'action peut s'arrêter là et la filière être finalement déclarée non pertinente. Dans le meilleur des cas, les actions successives permettent d'amener la filière émergente à maturité technologique et elle peut être industrialisée.

2.3 DE QUOI A-T-ON BESOIN ?

Pour mener à bien l'orientation des filières infrarouge émergentes, il faut donc :

- avoir une bonne connaissance des applications, aussi bien militaires que civiles. Les travaux d'expertise menés de longue date par l'ONERA pour la DGA (notamment suivi de programmes) ou pour des industriels nous permettent d'avoir une bonne visibilité des besoins défense. Des travaux plus récents dans le domaine de l'astronomie ou de la domotique nous permettent également d'appréhender les besoins liés aux applications civiles.

- bien connaître l'état de l'art des filières infrarouge commerciales. Cela passe là encore par des actions d'expertise, consistant en des caractérisations électro-optiques de détecteurs commerciaux français ou étrangers, toutes filières confondues. C'est là le cœur de métier du laboratoire de caractérisation de détecteurs infrarouge de l'ONERA (appelé AIQUIDO pour Analyse, Interprétation, Qualification et Intégration de Détecteurs Optiques), qui a notamment un contrat d'expertise récurrent avec la DGA sur l'expertise détecteurs
- réaliser des mesures électro-optiques fines grâce à des bancs de tests innovants, donnant accès à de nouvelles figures de mérite ou à des conditions de mesures inédites. Ces mesures doivent ensuite être interprétées, par exemple à l'aide de modèles pour comprendre la physique de la détection. Ces mêmes modèles sont très utiles lors des discussions avec les technologues pour orienter les futurs développements. Le développement de bancs de test et de modèles fait également partie des missions du laboratoire AIQUIDO. Ce travail est généralement réalisé dans un cadre académique (financé sur fonds propres ONERA ou à travers des bourses de thèses ou de post-docs).

2.4 IMPLICATION PERSONNELLE

Après avoir soutenu ma thèse en septembre 2001¹ [Ribet, 2001], j'ai intégré l'équipe DOTA/CIO (unité Concepts Innovants en Optique du Département Optique Théorique et Appliquée) et son laboratoire de caractérisation de détecteurs infrarouge, alors en pleine évolution.

En effet, jusqu'à la fin des années 90, ce laboratoire avait essentiellement travaillé sur la filière HgCdTe. Les thèses qui s'y déroulaient portaient soit sur le développement de moyens de mesure, soit sur l'utilisation optimale de ces détecteurs HgCdTe dans des systèmes infrarouge. Mais avec l'apparition de filières concurrentes (telles que les microbolomètres et les détecteurs à multipuits quantiques dans un premier temps), le champ d'action du laboratoire s'est élargi, et c'est dans ce contexte que j'ai été recrutée. J'ai ainsi porté très rapidement une attention particulière aux filières émergentes, en travaillant dès 2001 sur les détecteurs à multipuits quantiques (aujourd'hui devenus une filière commerciale), et à partir de 2005 sur les détecteurs à super-réseau (filiale toujours en phase d'optimisation, et qui fera l'objet d'un chapitre entier de ce manuscrit). Comme expliqué au paragraphe précédent, orienter une filière consiste entre autres à jouer le rôle de passerelle entre monde académique, monde industriel et donneurs d'ordres. Ces travaux ont ainsi été l'occasion d'initier plusieurs collaborations, en France (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Bretagne (ENIB), université de Montpellier) et à l'étranger (Fraunhofer-IAF en Allemagne, IR-Nova en

1. Thèse consacrée au développement de sources laser accordables en longueur d'onde et au diagnostic d'écoulements gazeux à l'aide de techniques d'optique non linéaire. Thèse réalisée au sein du Département de Mesures PHysiques (DMPH) de l'ONERA, encadrée par Michel Lefebvre et dirigée par Daniel Robert (université de Franche-Comté).

Suède, université du Nouveau-Mexique et Air Force Research Laboratory aux Etats-Unis).

J'ai également encadré trois thèses, dédiées au développement de nouveaux bancs de test (thèse de Judikaël Le Rouzo, en collaboration avec l'ENIB, soutenue en 2007), à la modélisation des phénomènes physiques limitant les performances d'une filière donnée (thèse d'Emmanuel Lhuillier, en collaboration avec Paris VII et le III-V Lab, soutenue en 2010) ou à l'étude et l'optimisation d'une filière émergente particulière (thèse d'Edouard Giard, en collaboration avec l'université de Montpellier, soutenue en 2015). Cette dernière thèse faisait suite au post-doc de Katarzyna Jaworowicz (2009-2011), que j'ai également encadré. Enfin, j'ai été associée comme co-directrice à deux thèses qui se sont déroulées à l'université de Montpellier (thèse Cyril Cervera, soutenue en 2011, et thèse de Rachid Taalat, soutenue en 2013).

De 2010 à 2014, j'ai assuré la responsabilité du laboratoire AIQUIDO, qui comptait alors 7 permanents et 2 doctorants. Mon rôle était de coordonner les différentes activités du laboratoire, d'orienter les travaux de recherche et de trouver de nouvelles sources de financement.

En 2011, j'ai été nommée responsable du projet Mélusine, d'une durée de 3 ans, dont l'objectif était de réaliser l'expertise de détecteurs infrarouge pour la DGA. Je suis également responsable du projet Mélusine 2 (2015-2018), qui lui fait suite sur le même sujet.

C'est également en 2011 que j'ai commencé à enseigner dans deux écoles d'ingénieurs (l'IOGS (Institut d'Optique Graduate School) et Polytech Paris Sud). En 2014, j'ai pu conforter mes activités d'enseignement, elles aussi centrées sur la détection, à travers un poste de PAST (personnel associé à statut temporaire) à l'IOGS (Institut d'Optique Graduate School). Je donne aujourd'hui la moitié de mes heures d'enseignement dans le cursus d'ingénieur classique, et l'autre moitié dans le cadre de stages de formation continue. Ces actions de formation continue sont l'occasion de rencontrer dans un autre contexte les industriels et les donneurs d'ordres français. Cela me permet d'avoir un autre angle de vue sur les différentes applications de l'infrarouge, aussi bien civiles que militaires, et ainsi de conforter mon expertise dans le domaine.

Ce manuscrit se divise en trois grandes parties. Le paragraphe II présente quelques outils que j'ai contribué à développer, qu'il s'agisse de bancs de test ou de modèles. Le paragraphe III présente en détail la démarche que j'ai mise en place pour l'orientation de la filière super-réseau. Enfin, le paragraphe IV fait la synthèse des actions d'enseignement que j'ai entreprises.

DEVELOPPEMENT DES OUTILS NECESSAIRES A L'ORIENTATION DES FILIERES EMERGENTES

Sommaire

3.1	Développement de bancs de tests innovants	12
3.1.1	Banc de mesure de réponse spectrale hors bande	12
3.1.2	Banc de mesure de réponse angulaire	14
3.1.3	Banc de mesure de réponse sous flux	17
3.1.4	Banc de mesure de bruit	20
3.1.5	Banc de mesure de temps de vie	21
3.1.6	Prochains challenges au laboratoire AIQUIDO	23
3.2	Mise en place de modèles pour comprendre la physique de la détection	24
3.2.1	Modélisation du couplage optique dans les détecteurs à multipuits quantiques	25
3.2.2	Modélisation du transport électronique dans les détec- teurs à multipuits quantiques	26
3.2.3	Modélisation des performances d'un instrument infra- rouge	29

L'orientation d'une filière émergente nécessite d'évaluer très précisément ses performances électro-optiques. Les technologues qui fabriquent les premiers détecteurs de cette filière réalisent déjà eux-mêmes un certain nombre de mesures, pour orienter leurs propres travaux ou pour opérer une première sélection sur leurs composants. Les mesures faites par l'ONERA doivent donc être complémentaires et apporter des informations nouvelles. Généralement, nous nous positionnons sur la mesure de performances ultimes, c'est-à-dire dans des conditions de fonctionnement extrêmes : mesures de courants d'obscurité inférieurs au femtoampère, mesures sous très faibles flux, mesures de très faibles bruits... dans le but de comprendre les phénomènes physiques limitant les performances de la filière considérée, ou d'extraire des paramètres technologiques utiles aux technologues. Pour certaines applications très hautes performances, il nous est aussi arrivé d'identifier le besoin de mesurer une figure de mérite non usuelle, et nous avons alors développé le banc de test approprié, de façon à évaluer les performances de la filière émergente pour cette classe d'applications particulière.

Dans cette partie, je présente les outils que j'ai contribué à développer : cinq bancs de tests, ainsi que deux outils de modélisation dont nous avons eu besoin pour comprendre la physique de la détection de filières émergentes particulières.

3.1 DÉVELOPPEMENT DE BANCS DE TESTS INNOVANTS

Le [Tableau 3.1](#) récapitule les bancs décrits dans ce paragraphe.

Nom du banc	Paramètres accessibles à la mesure	Personnes ayant contribuées au développement du banc	Paragraphe
Réponse spectrale hors bande	Réponse spectrale en-dehors de la bande de détection	Judikaël Le Rouzo	3.1.1
BRASIL	Réponse angulaire	Judikaël Le Rouzo	3.1.2
Réponse sous flux	Rendement quantique	Edouard Giard	3.1.3
Bruit	Bruit temporel	Edouard Giard, Bich-Lien Nghiem	3.1.4
Temps de vie	Temps de vie des porteurs minoritaires	Edouard Giard	3.1.5

TABLE 3.1 – Synthèse des bancs innovants développés.

3.1.1 Banc de mesure de réponse spectrale hors bande

Mesurer la réponse spectrale « hors bande » d'un détecteur consiste à étudier sa réponse au-delà de la gamme de longueurs d'onde pour laquelle il a été optimisé, grâce à une grande dynamique de mesure. Cela a un double intérêt : tout d'abord, pour des applications multispectrales ou hyperspectrales, pour lesquelles la raideur des fronts de coupure et le taux de réjection entre bandes spectrales est critique ; mais également d'un point de vue de la physique de la détection, puisque l'analyse de la réponse spectrale hors bande permet d'identifier les transitions électroniques mises en jeu dans le processus de détection.

Le banc de mesure de réponse spectrale hors bande repose sur un spectromètre à transformée de Fourier infrarouge (FTIR) du commerce. A mon arrivée en 2001, j'ai bénéficié de l'expérience de l'équipe du laboratoire AIQUIDO qui était en train d'adapter ce FTIR pour la mesure de réponse spectrale classique (dans la bande) de détecteurs infrarouge matriciels. Le matériel étant disponible et le traitement des données bien maîtrisé, il ne restait plus qu'à adapter le banc pour faire des mesures « hors bande ». Cela a constitué la première partie de la thèse de mon premier doctorant, Judikaël Le Rouzo (bourse DGA 2004-2007, direction de thèse Yann Boucher (ENIB)). L'effort a essentiellement porté sur le développement de l'enceinte cryogénique (indépendante du spectromètre), et sur l'électronique de traitement du signal. Toute la difficulté de cette mesure réside en effet dans la grande dynamique de mesure requise.

La [Figure 3.1](#) présente le schéma de principe du banc de mesure de réponse spectrale hors bande, et la [Figure 3.2](#) les mesures obtenues sur un détecteur

multipuits quantiques (MPQ) du III-V Lab (longueur d'onde pic $8.5\mu\text{m}$, pixels de $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, sans structure de couplage).

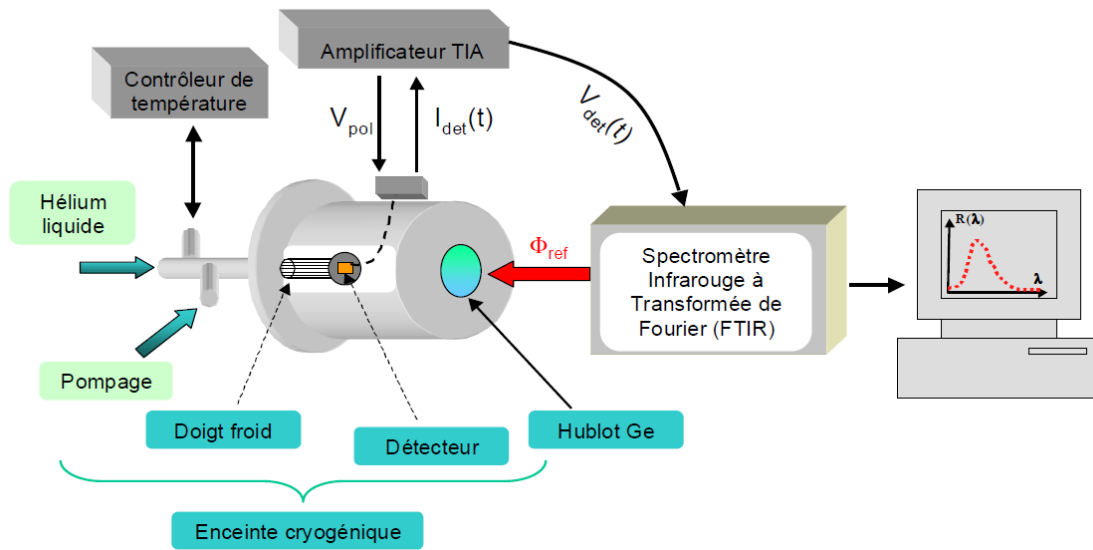


FIGURE 3.1 – Schéma de principe du banc de mesure de réponse spectrale hors bande [Le Rouzo, 2007].

La Figure 3.2 nous a permis de faire deux observations originales : d'une part, la réponse spectrale aux basses énergies (hautes longueurs d'ondes) est affectée par le champ électrique appliqué. En effet lorsque la tension de polarisation augmente, la réponse augmente. D'autre part, ces mesures montrent la présence de signatures (creux et pics signalés par des flèches grises sur la figure) dans la réponse aux hautes énergies (basses longueurs d'onde). Ce dernier phénomène est indépendant du champ électrique. Afin d'interpréter ces deux effets, nous avons mené une étude théorique sur l'absorption dans une structure à multipuits quantiques. Un modèle qualitatif assez simple de type Kronig-Penney [Le Rouzo *et al.*, 2006a,b, 2007] - ne tenant notamment pas compte des différents mécanismes de transport dans les détecteurs à multipuits quantiques - nous a permis de conclure que les signatures spectrales observées aux hautes énergies correspondent à des points critiques dans la densité d'états électroniques assimilables à des singularités de Van Hove [Van Hove, 1953]. Et c'est l'effet tunnel assisté par champ électrique, ou effet Fowler-Nordheim [Fowler et Nordheim, 1928], qui explique la dépendance en champ électrique de la réponse observée aux basses énergies. Ce travail de modélisation a été poursuivi par mon deuxième doctorant, Emmanuel Lhuillier, qui s'est attelé à la modélisation du transport électronique dans les détecteurs à multipuits quantiques (voir paragraphe 3.2.2). Quant au banc de mesure de réponse spectrale hors bande, il est désormais utilisé de façon routinière lors des actions d'expertise menées au laboratoire AIQUIDO (notamment sur des composants multispectraux).

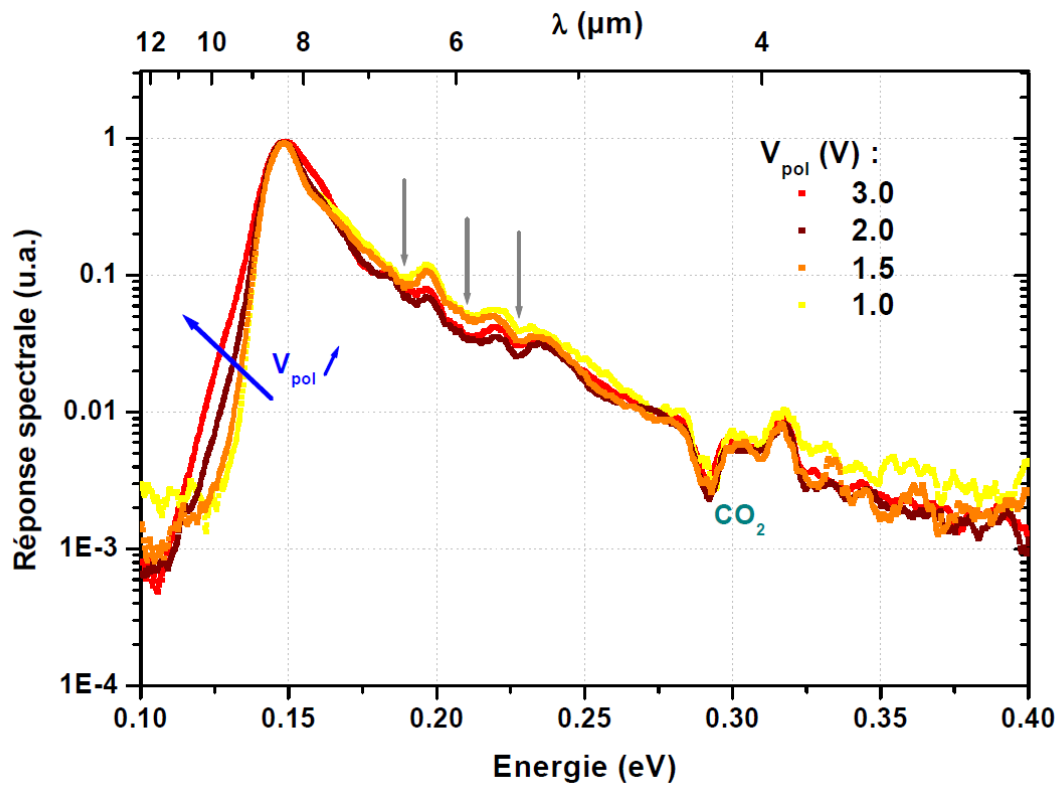


FIGURE 3.2 – Réponse spectrale (en échelle Log) d'un composant MPQ pour différentes tensions de polarisation [Le Rouzo, 2007]. Les flèches grises matérialisent les pics et les creux mis en évidence aux hautes énergies et attribués à des singularités de Van Hove.

3.1.2 Banc de mesure de réponse angulaire

Comme mentionné en introduction du [Chapitre 3](#), certaines applications très hautes performances nécessitent la définition de nouvelles figures de mérite. C'est le cas de l'imagerie radiométrique infrarouge, dont l'objectif n'est pas seulement de réaliser une image qualitative de la scène observée, mais d'en extraire une cartographie de luminance. Cette inversion de la mesure nécessite de connaître parfaitement la réponse de chacun des pixels de la matrice (ou de la barrette) utilisée. Or, certains des radiomètres imageurs grand champ développés par l'ONERA mènent à des angles d'incidence très élevés sur les pixels en bord de matrice. Il est donc judicieux de se demander si l'angle d'incidence affecte la réponse d'un pixel (cf [Figure 3.3](#)).

L'émergence de la filière multipuits quantiques a donné une raison d'être supplémentaire à cette nouvelle figure de mérite. En effet, les règles de sélection (expliquées par la mécanique quantique) stipulent qu'un pixel multipuits quantique ne peut pas absorber la lumière arrivant en incidence normale. Il est donc nécessaire de réaliser une structure sur le dessus du pixel, de façon à coupler efficacement la lumière dans les puits. Plusieurs structures ont été proposées (voir [Figure 3.4](#)), parmi lesquelles le réseau de diffraction en deux dimensions, utilisé aux début des années 2000 par le III-V Lab et l'institut Fraunhofer-IAF. Or, un réseau de diffraction a un comportement qui dépend fortement de l'angle d'in-

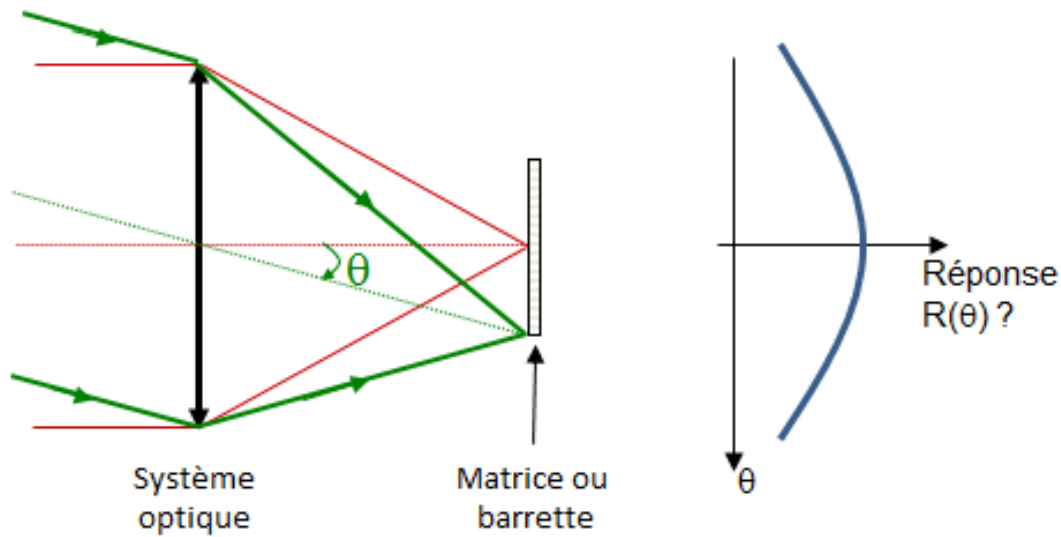


FIGURE 3.3 – Dépendance de la réponse en fonction de l'angle d'incidence θ . α : angle d'ouverture.

cidence. Il était donc assez probable qu'une structure de diffraction optimisée pour l'incidence normale serait moins efficace en incidence oblique.

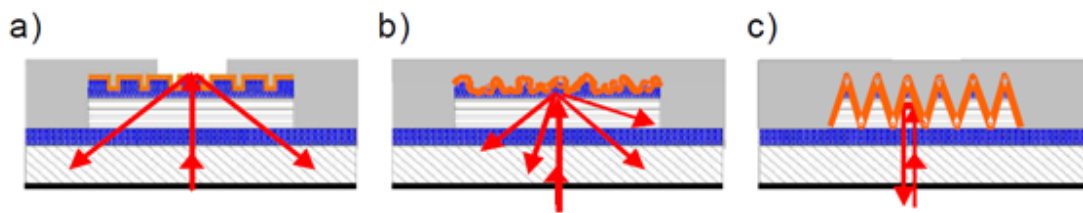


FIGURE 3.4 – Différents schémas de couplage optiques pour un détecteur multipixels quantiques : a) Couplage par réseaux (1D ou 2D), b) Couplage par réflexion aléatoire, c) Couplage par pyramides (« corrugated structures »).

Le Laboratoire AIQUIDO a donc conçu un banc de test permettant la mesure de la réponse angulaire de détecteurs infrarouge refroidis, mono-éléments ou matriciels. Le principe du banc est décrit Figure 3.5 : le corps noir utilisé comme source et le détecteur à tester sont positionnés dans une unique enceinte cryogénique, afin de permettre une grande excursion angulaire, et aussi de limiter le flux parasite. Ce banc a été nommé BRASIL pour Banc de Réponse Angulaire Spécifique pour l'Infrarouge Lointain. J'ai rejoint l'équipe au moment où les pièces étaient en cours de réalisation, et j'ai été chargée d'assembler et de valider ce banc de test sur une première série de détecteurs MPQ réalisés par le III-V Lab. J'ai ainsi eu l'occasion de mettre en évidence l'influence de la période du réseau sur la réponse angulaire du pixel [Ribet-Mohamed *et al.*, 2005a], en comparant les mesures de réponse angulaire à des réponses spectrales sous incidence. Ces premiers résultats m'ont permis d'initier une collaboration avec l'institut Fraunhofer-IAF en Allemagne, qui nous a envoyé des détecteurs MPQ

avec une structure originale dite « faible bruit », afin que nous les caractérisions, notamment en réponse angulaire. C'est Judikaël Le Rouzo qui s'est chargé de ces mesures dans le cadre de sa thèse. La Figure 3.6 montre les résultats expérimentaux obtenus sur deux monoéléments de profondeur de gravure différente. Il s'avère que la réponse angulaire est relativement plate pour des angles inférieurs à 20° , puis décroît doucement pour finalement chuter plus brutalement pour $\theta < -60^\circ$ ou $\theta > 70^\circ$. Afin d'interpréter ces résultats et pouvoir conseiller les technologues sur le choix et l'optimisation de leur structure de couplage, nous avons développé un modèle empirique qui sera décrit au paragraphe 3.2.

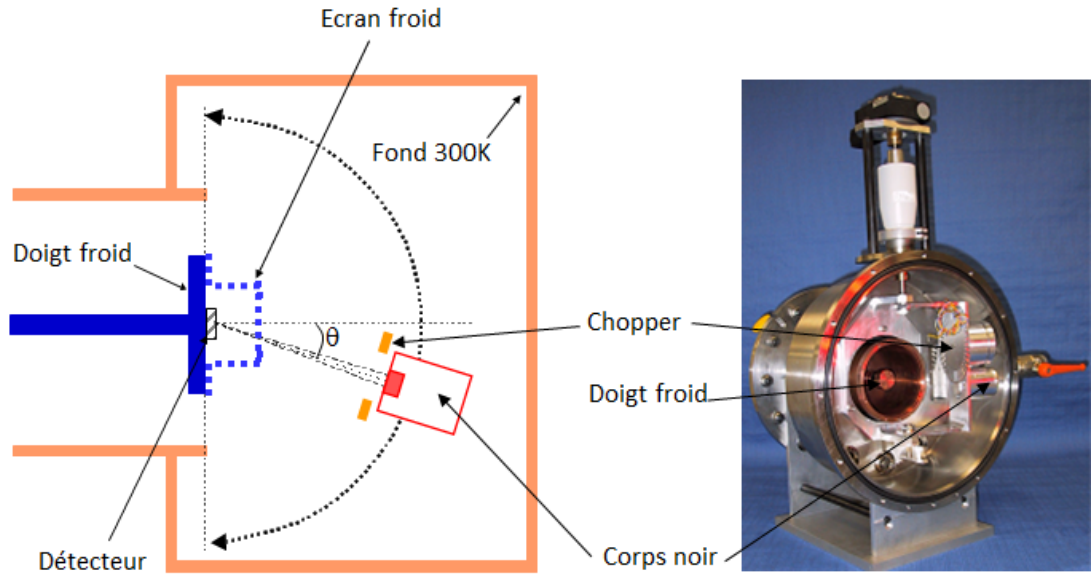


FIGURE 3.5 – Principe du banc de mesure de réponse angulaire, vu de dessus (à gauche) et photo du banc BRASIL, vu de face et capot démonté (à droite).

Dans la prolongation des mesures de réponse angulaire sur des détecteurs de type monoéléments de la filière multipuits quantiques, nous nous sommes ensuite intéressés à des détecteurs matriciels HgCdTe. Nous avons observé une réponse quasiment plate pour des composants à géométrie planaire, qui correspond bien à ce que la modélisation prévoit. En revanche, ce n'est plus le cas pour des composants bispectraux à géométrie mesa, pour lesquels la réponse angulaire peut même parfois augmenter avec l'angle d'incidence ! Nous avons attribué cet effet à un confinement du flux incident à l'intérieur du pixel grâce à des réflexions sur les parois des mesas. Le banc BRASIL a également été utilisé pour réaliser les premières mesures de réponse angulaire sur un détecteur de la filière super-réseau [Giard *et al.*, 2014c], et est disponible au laboratoire pour les actions d'expertise du laboratoire AIQUIDO.

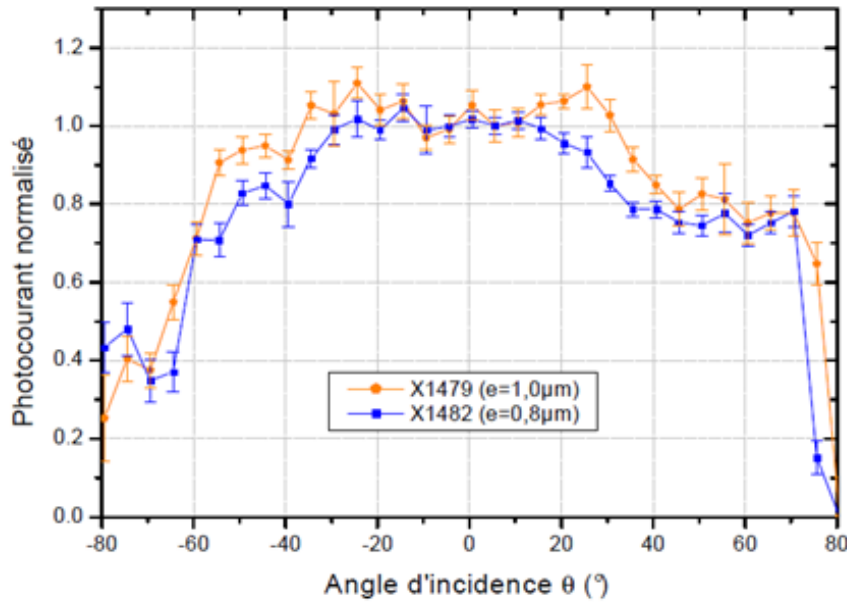


FIGURE 3.6 – Réponse angulaire de deux détecteurs MPQ de l’institut Fraunhofer-IAF (profondeurs de gravure du réseau différentes : $e = 1\mu\text{m}$ pour le composant X1479, et $e = 0,8\mu\text{m}$ pour le composant X1482. Conditions expérimentales : $V_{\text{pol}}=1,6\text{V}$ et $T_{\text{det}} = 50\text{K}$. [Le Rouzo, 2007]. Les courbes sont normalisées par rapport à $\theta = 0^\circ$.

3.1.3 Banc de mesure de réponse sous flux

Dans le principe, la mesure de rendement quantique est simple : il suffit d’envoyer sur le détecteur à tester un flux infrarouge rigoureusement contrôlé, et mesurer le courant photogénéré I_{ph} , puisque :

$$I_{\text{ph}} = \eta \cdot q \cdot \Phi_{\text{ph}} \quad (3.1)$$

Où η est le rendement quantique et Φ_{ph} le flux incident sur le détecteur, dans sa bande spectrale, en photons/seconde, donné par :

$$\Phi_{\text{ph}} = L_{\text{CN}}(T_{\text{CN}}) \cdot G \quad (3.2)$$

Où $L_{\text{CN}}(T_{\text{CN}})$ est la luminance du corps noir utilisé pour la mesure (en $\text{ph}/\text{m}^2/\text{sr}$) et G l’étendue géométrique dans la configuration utilisée (en $\text{m}^2.\text{sr}$).

D’un point de vue pratique, les choses sont un peu plus compliquées, à cause des sources d’erreurs et d’incertitudes radiométriques :

- la température réelle du corps noir peut différer de la température de consigne
- l’émissivité du corps noir peut ne pas être égale à 1 (surtout pour les corps noirs étendus)
- il existe toujours une incertitude sur l’étendue géométrique (taille du diaphragme, distance diaphragme-détecteurs, ...)
- sans compter le flux parasite, toujours problématique en infrarouge, qui nécessite des systèmes d’écrantage sophistiqués.

Nous avons mis en place et comparé deux bancs de mesure de rendement quantique : l’un avec un corps noir étendu (voir Figure 3.7), l’autre avec un

corps noir cavité et un shutter (voir [Figure 3.8](#)). Les sources d'erreur radiométriques étant différentes entre les deux bancs, si les mesures coïncident, cela confirme qu'elles ont été éradiquées. C'est effectivement le résultat auquel mon troisième doctorant, Edouard Giard, est arrivé au début de sa thèse [[Giard et al., 2014c](#)] (bourse ONERA, direction de thèse Philippe Christol de l'université de Montpellier).

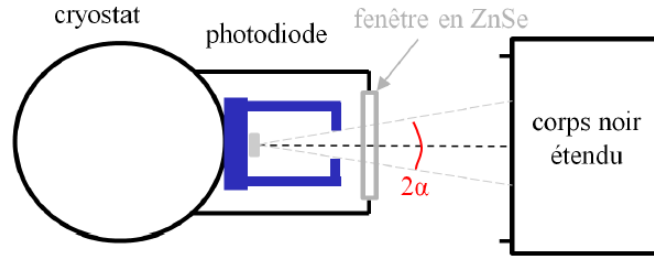


FIGURE 3.7 – Banc de mesure de rendement quantique avec corps noir étendu (vue de dessus). Dans ce cas, l'étendue géométrique est définie par l'écran froid (en bleu). Les principales sources d'erreurs/incertitudes radiométriques sont : l'étendue géométrique, l'émissivité du corps noir, sa température, son homogénéité et la transmission du hublot en incidence. Les températures de corps noirs accessibles avec ce montage sont 10°C-400°C.

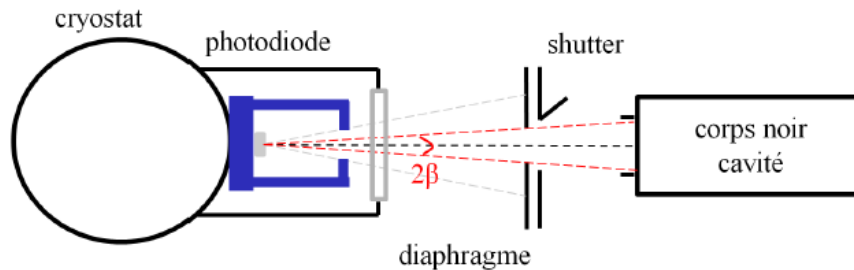


FIGURE 3.8 – Banc de mesure de rendement quantique avec corps noir cavité (vue de dessus). Dans ce cas, l'étendue géométrique est définie par le diaphragme ; le corps noir à cavité permet d'atteindre des températures supérieures, et donc des gammes de flux plus importantes. Les principales sources d'erreurs/incertitudes radiométriques sont : le flux parasite (potentiellement fluctuant) lié au shutter, l'échauffement des différents éléments. Les températures de corps noirs accessibles avec ce montage sont 500°C-1200°C.

La [Figure 3.9](#) compare les mesures obtenues avec les deux bancs de mesure sous flux pour un détecteur super-réseau. Le rendement quantique est proportionnel à la pente des droites (qui est bien la même dans les deux cas). Le décalage à l'origine est lié au fait que le premier banc donne accès au courant total (photonique + obscurité) alors que le second donne accès au courant photonique seul (le courant d'obscurité ayant été automatiquement retranché avec le shutter). On voit clairement apparaître que la gamme de flux accessible avec le corps noir à cavité est plus étendue.

La [Figure 3.10](#) présente un exemple de courbe de rendement quantique absolu en fonction de la longueur d'onde.

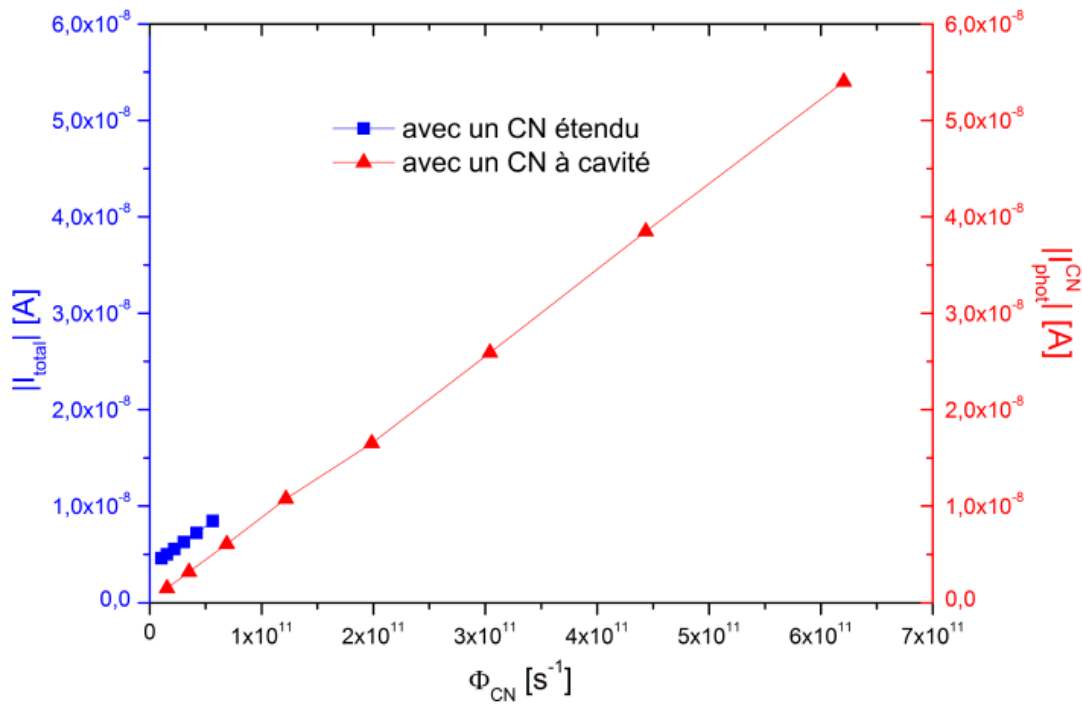


FIGURE 3.9 – Comparaison des mesures obtenues avec les deux bancs de réponse sous flux pour un détecteur super-réseau (photodiode InAs-rich avec une zone active d'épaisseur $1\mu\text{m}$ - $V_{\text{pol}} = -0.1\text{V}$) [Giard, 2015].

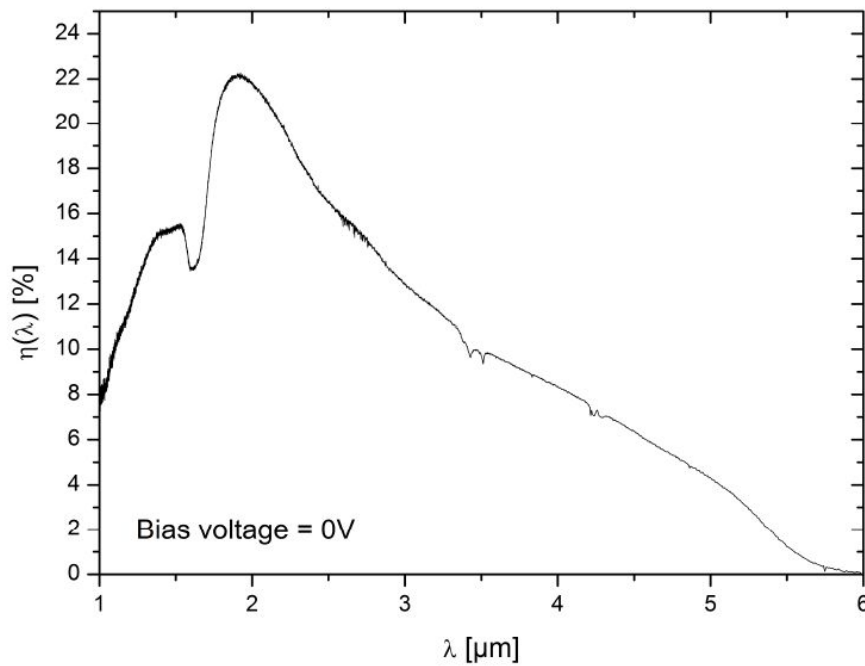


FIGURE 3.10 – Mesure de rendement quantique en fonction de la longueur d'onde sur un détecteur super-réseau InAs-rich 7/4 avec une zone active d'épaisseur $1\mu\text{m}$ - $V_{\text{pol}} = 0\text{V}$) [Giard, 2015].

La validation de ces bancs de tests a permis (toujours dans le cadre de la thèse d'Edouard Giard) une étude exhaustive du rendement quantique de détecteurs

à super-réseau avec des structures différentes, dont les principales retombées sont : l'identification du phénomène limitant le rendement quantique de ces détecteurs, et une mesure indirecte de la longueur de diffusion des trous dans ces structures (voir paragraphe 4.3). Au-delà du travail de thèse concerné, cette démarche a permis d'améliorer la fiabilité et la reproductibilité des mesures de rendement quantique faites au laboratoire AIQUIDO, ainsi qu'une intercomparaison des différents corps noirs disponibles au laboratoire.

3.1.4 Banc de mesure de bruit

Nous avons essentiellement parlé jusqu'ici de réponse et de rendement quantique, qui sont deux figures de mérite – liées entre elles – qui permettent d'estimer l'efficacité de la conversion des photons en électrons. Mais savoir prédire le signal délivré par un détecteur ne suffit pas à prédire ses performances : il faut également connaître le bruit associé, de façon à avoir accès au rapport signal à bruit. Rappelons que lors de la mise en œuvre d'un détecteur, les sources de bruit sont diverses :

- certains bruits prennent naissance dans la photodiode : par exemple le bruit de photons, le bruit d'obscurité, le bruit thermique et le bruit en $1/f$
- en configuration matricielle, le circuit de lecture a lui aussi un bruit propre
- la chaîne de mesure peut également contribuer au bruit total, par exemple à travers le convertisseur analogique-numérique en configuration matricielle, ou à travers l'amplificateur transimpédance en configuration mono-élément.

Ces bruits peuvent avoir une signature temporelle (fluctuations du signal délivré par un pixel donné, dans le temps) et/ou une signature spatiale (bruit spatial fixe observé sur une image prise à un instant donné, particulièrement visible quand on observe un fond uniforme).

L'étude du bruit spatial est primordiale dans l'estimation du potentiel d'une filière de détecteurs infrarouge, car elle détermine son uniformité et la stabilité dans le temps des éventuelles corrections appliquées. Dans le cadre des mesures présentées ici, nous nous sommes limités aux mesures accessibles sur des monoéléments, à savoir les mesures de bruit temporel, qui peut alors s'écrire :

$$\sigma_{\text{TOT}}^i = \sqrt{\sigma_{\text{Schottky}}^i{}^2 + \sigma_{\text{obs}}^i{}^2 + \sigma_{\text{Johnson}}^i{}^2 + \sigma_{1/f}^i{}^2} \quad (3.3)$$

Avec σ_{TOT}^i (bruit total), $\sigma_{\text{Schottky}}^i$ (bruit de photons), σ_{obs}^i (bruit d'obscurité), $\sigma_{\text{Johnson}}^i$ (bruit thermique) et $\sigma_{1/f}^i$ (bruit en $1/f$) en A. Pour pouvoir utiliser une somme quadratique, les différentes contributions au bruit sont supposées indépendantes d'un point de vue statistique.

Plus une filière est mature, plus les bruits à mesurer seront faibles. Il faut donc les amplifier fortement pour pouvoir les quantifier avec un analyseur de spectre. Cependant, l'amplificateur transimpédance utilisé ramène un bruit supplémentaire. De plus, sa fréquence de coupure limite la bande passante de mesure. Il doit donc être judicieusement choisi. Il faut ensuite une maîtrise extrêmement rigoureuse de l'environnement électronique.

J'ai initié ce travail à travers le post-doc de Katarzyna Jaworowicz [Jaworowicz *et al.*, 2011]; il a été poursuivi par Bich-Lien Nghiem dans le cadre de son stage de fin d'études, puis par Edouard Giard [Giard *et al.*, 2014c] dans le cadre de sa thèse.

La Figure 3.11 présente le schéma du banc de test auquel nous avons abouti. La Figure 3.12 montre un exemple de spectre de bruit obtenu (bruit total, c'est-à-dire cumulant le bruit propre de la photodiode et le bruit de la chaîne de mesure), où on voit clairement apparaître les différentes contributions de bruit d'une photodiode : bruit en $1/f$ aux faibles fréquences, plateau de bruit propre, appelé ici bruit Schottky car c'est la somme quadratique du bruit de photons et du bruit d'obscurité (le bruit Johnson est négligeable). Le bruit de l'amplificateur reste bien négligeable par rapport au bruit total, et la bande passante est suffisante pour voir le plateau de bruit propre.

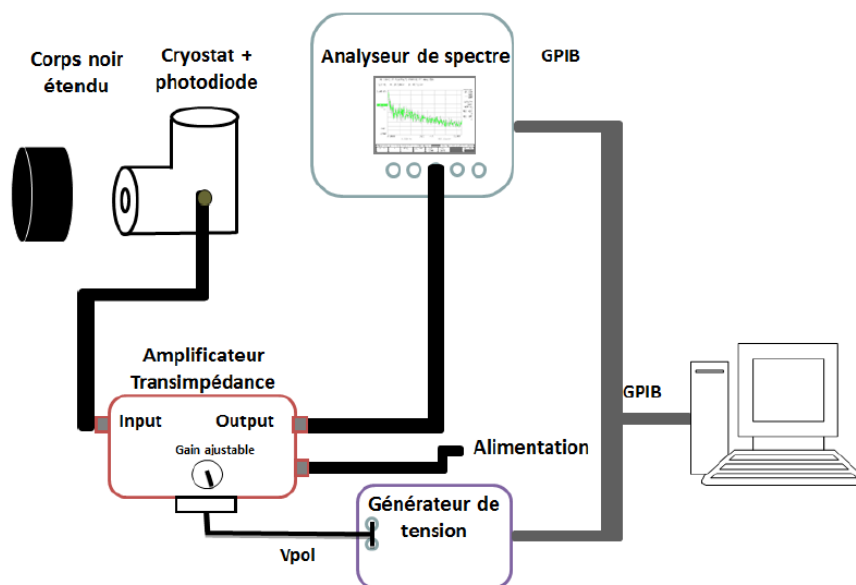


FIGURE 3.11 – Montage expérimental développé pour la mesure du bruit temporel de monoéléments.

Ce banc de test a été utilisé pour étudier en détail le comportement en bruit des détecteurs à super-réseau, comme nous le verrons au Chapitre 4, qui leur est dédié. Le savoir-faire développé permettrait d'adapter ce banc à n'importe quel autre type de détecteurs sous forme de monoéléments.

3.1.5 Banc de mesure de temps de vie

Même si les caractérisations électro-optiques menées au laboratoire AIQUIDO permettent parfois de remonter de façon indirecte à des paramètres technologiques (épaisseur de zone active, longueur de diffusion...), ce sont généralement les technologues qui réalisent eux-mêmes la caractérisation de leurs matériaux (mesures de diffraction aux Rayons X, mesures de Hall, etc). Les temps de vie sont une exception à cette règle tacite, puisque nous avons développé le banc de test nécessaire à cette mesure sur des échantillons de type super-réseau

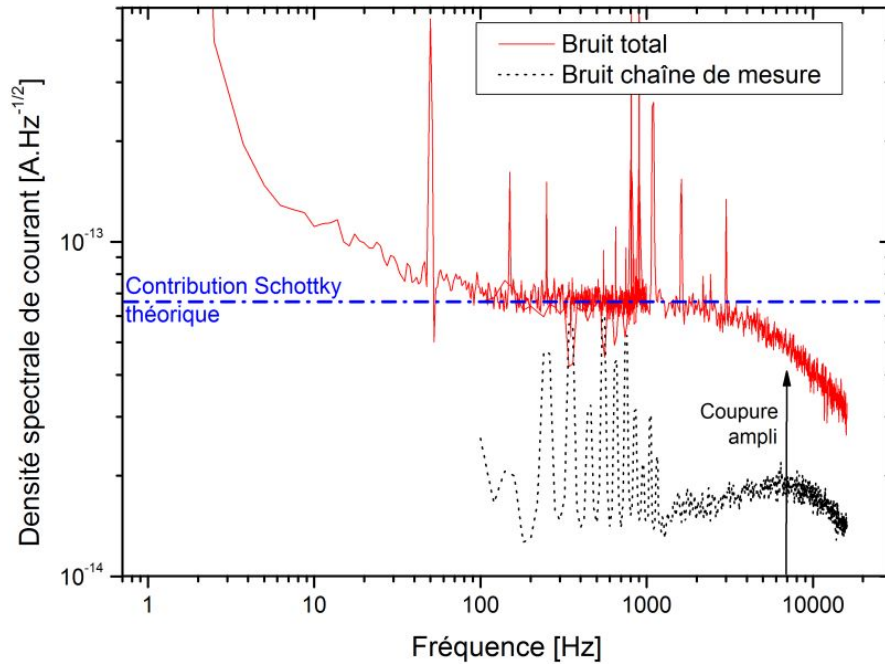


FIGURE 3.12 – Densité spectrale de courant d’une photodiode à super-réseau, définie comme la racine carrée de la densité spectrale de bruit. Cas d’une structure InAs-rich d’épaisseur $1\mu\text{m}$, à $V_{\text{pol}} = -1.2\text{V}$ et placée devant un corps noir à 60°C [Giard, 2015]. Les axes des abscisses et des ordonnées sont en échelle logarithmique.

MWIR. Le temps de vie des porteurs minoritaires influence à la fois le courant d’obscurité et le rendement quantique d’une photodiode : un long temps de vie permettra d’avoir à la fois moins de courant d’obscurité et un meilleur rendement quantique à coefficient d’absorption équivalent. C’est donc un paramètre très intéressant à mesurer pour estimer le potentiel d’une filière émergente. En ce qui concerne la filière super-réseau, plusieurs techniques ont été reportées dans la littérature pour accéder à ce paramètre, soit de façon indirecte, soit de façon directe. Après une étude bibliographique, nous avons choisi la technique directe de photoluminescence résolue en temps. Le principe est le suivant : une source laser est focalisée sur l’échantillon, et le signal de photoluminescence, collecté par une optique, est envoyé vers un détecteur très rapide pour analyser sa décroissance temporelle. Soulignons que l’échantillon mentionné ici est spécifique pour cette mesure : ce n’est pas une photodiode, mais une simple zone active entourée de deux barrières de confinement. C’est Edouard Giard, dans le cadre de sa thèse, qui a développé et mis en œuvre ce nouveau banc de test (voir schéma de principe Figure 3.13). Les premières mesures obtenues sur des échantillons réalisées par l’IES étant assez surprenantes, nous avons cherché à valider notre banc de test par comparaison avec d’autres bancs existant. Pour ce faire, j’ai initié une collaboration avec l’université du Nouveau-Mexique, qui a accepté de nous envoyer des échantillons qui avaient déjà été caractéri-

sés aux Etats-Unis, et de réaliser un échantillon identique (en théorie) à l'un des échantillons de l'IES. La Figure 3.14 montre un exemple de résultat obtenu. Les mesures sont en cours d'analyse, en collaboration avec l'IES, le CHTM et l'AFRL (ce dernier laboratoire réalisant également des mesures de temps de vie, aux Etats-Unis).

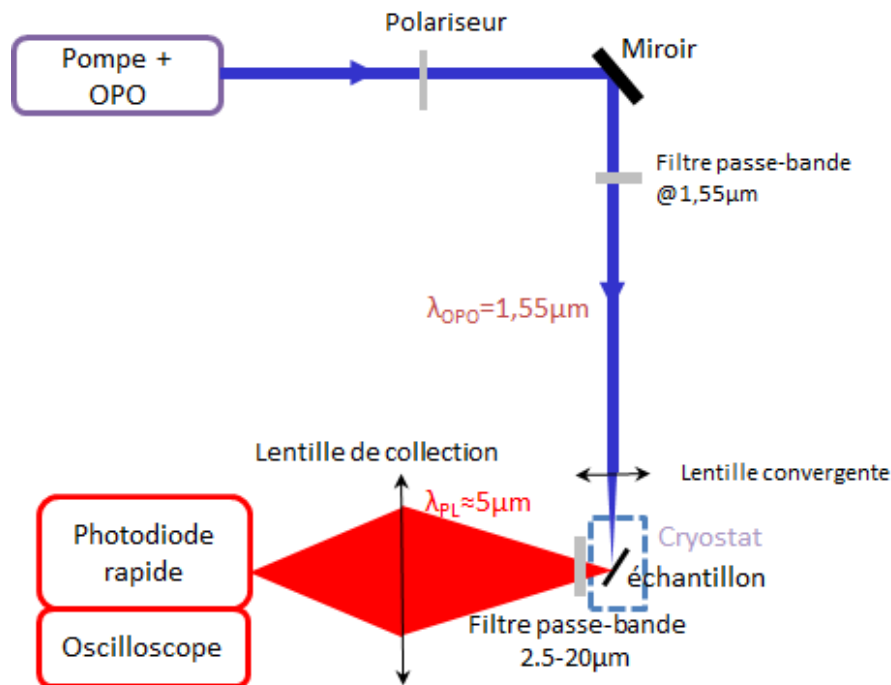


FIGURE 3.13 – Schéma du banc de mesure de temps de vie par une technique de photoluminescence résolue en temps (TRPL). En bleu : excitation de la photoluminescence ; en rouge : collection et analyse du signal de photoluminescence.

Parmi les perspectives programmées, ce banc de test est amené à évoluer de façon à pouvoir également mesurer des temps de vie pour des échantillons dédiés à la gamme spectrale LWIR (cela nécessitera notamment de changer de source et de détecteur rapide). Cela fera partie du travail de thèse de Jean Nghiem-Xuan (commencée en octobre 2015).

3.1.6 Prochains challenges au laboratoire AIQUIDO

Les exemples de bancs de tests innovants décrits jusque-là correspondent aux bancs sur lesquels j'ai plus particulièrement travaillé, mais d'autres actions sont en cours au laboratoire AIQUIDO.

Nous avons notamment entamé une action d'ampleur concernant la mesure de réponse spatiale, incluant la FTM (Fonction de Transfert de Modulation des détecteurs). Ces mesures sont doublement intéressantes : d'une part, elles permettent d'en apprendre beaucoup sur la physique de la détection (notion de longueur de diffusion, de confinement par les pixels voisins...) mais elles sont également indispensable pour la prédiction des performances d'un instrument (la FTM globale étant le produit des différentes FTM élémentaires : optique, détecteur, stabilisation de la ligne de visée, visualisation...). Là encore, il existe

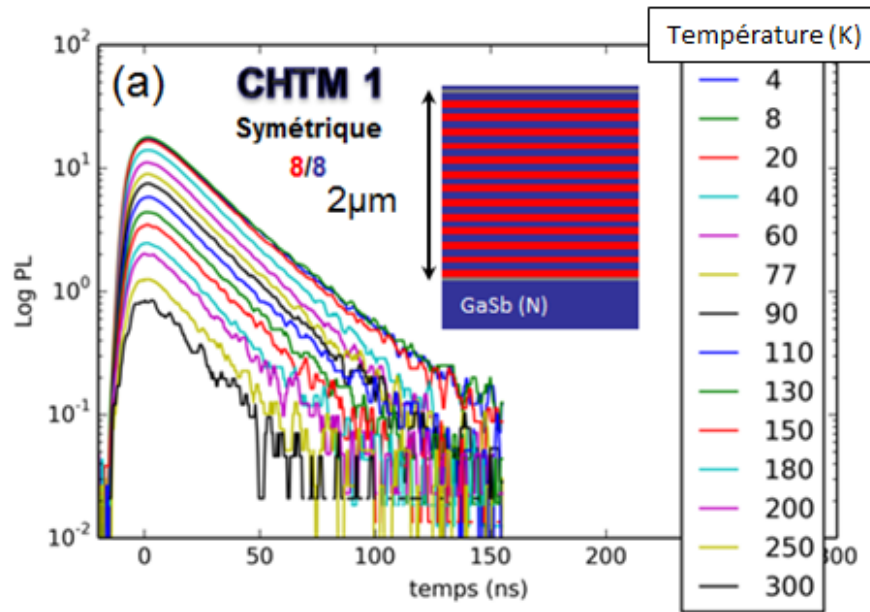


FIGURE 3.14 – Signal de photoluminescence obtenu pour différentes températures de fonctionnement (en K) sur un échantillon du CHTM [Giard, 2015]. Le temps de vie est extrait de l’analyse de la décroissance (ici, environ 55ns à 77K).

déjà de nombreuses techniques reportées dans la littérature : techniques directes (mesures par spot scan par exemple), ou indirectes (mesures par couteau de Foucault, par bord de plage incliné ou par CSIG¹ [Guérineau, 1999], ...). Mais la diminution du pas pixel des matrices à caractériser nécessite de reprendre l’analyse des points forts et des faiblesses de toutes les techniques existantes, voire même d’en imaginer de nouvelles. D’autres questions nécessitent également d’être adressées, telles que le lien entre FTM, diaphonie et diaphotie, ou encore le lien entre réponse spatiale et réponse spectrale.

Cette action est en cours depuis plus d’un an au sein du labo AIQUIDO. J’y contribue, notamment en apportant un cadre contractuel à certaines actions.

3.2 MISE EN PLACE DE MODÈLES POUR COMPRENDRE LA PHYSIQUE DE LA DÉTECTION

La principale mission du laboratoire AIQUIDO est un travail expérimental, puisqu’il s’agit de réaliser des mesures de performances électro-optiques de détecteurs optiques. Néanmoins, l’analyse et l’interprétation des résultats obtenus nécessitent souvent un travail de modélisation complémentaire. Ce travail peut d’ailleurs aider par la suite à optimiser la filière, en comparant différentes pistes envisagées pour l’amélioration des performances.

Nous préférons généralement développer des modèles reposant sur une description macroscopique des phénomènes observés. En effet, une description fine augmente souvent considérablement le nombre de paramètres technologiques

1. CSIG pour Continuously Self Imaging Grating ; technique dérivée du phénomène d’auto-imagerie par effet Talbot, qui permet de projeter des motifs fins, sans optique.

en entrée, paramètres auxquels nous n'avons pas forcément facilement accès. Ce sont donc généralement les technologues qui réalisent cette modélisation fine, car ils ont de plus un réel besoin d'outils prédictifs très précis pour orienter la conception des détecteurs optimisés. Nous verrons néanmoins un contre-exemple ci-dessous.

Dans ce paragraphe, je présente trois modèles très différents auxquels j'ai contribué :

- le premier (cf paragraphe 3.2.1) est un modèle du couplage optique dans les détecteurs à multipuits quantiques, qui rentre dans la catégorie des modèles macroscopiques.
- le second est au contraire un modèle très fin, qui décrit le transport électronique dans ces mêmes détecteurs à multipuits quantiques (cf paragraphe 3.2.2).
- enfin, le dernier est un outil complètement différent, qui permet de prédire les performances d'un instrument infrarouge en utilisant comme données d'entrée les résultats des caractérisations menées au laboratoire (cf paragraphe 3.2.3).

3.2.1 Modélisation du couplage optique dans les détecteurs à multipuits quantiques

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1.2, la réponse angulaire est une figure de mérite qui doit être considérée pour des applications très hautes performances telles que l'imagerie radiométrique infrarouge. En effet, dans ce cas, il est nécessaire de connaître la réponse de chacun des pixels, et celle-ci peut varier entre le centre et les extrémités de la matrice ou de la barrette utilisée, puisque les pixels extrêmes sont soumis à des angles d'incidence plus élevés que les pixels du centre. Remarquons qu'une réponse angulaire non plate n'est pas forcément rédhibitoire : l'important est de pouvoir corriger cet effet par traitement. Une réponse angulaire non plate, mais parfaitement connue et prédictible, est donc acceptable.

La première filière de détecteurs dont nous avons mesuré la réponse angulaire était celle des détecteurs multipuits quantiques. Cela se justifiait par le fait que ces détecteurs possèdent une structure de couplage de type réseau de diffraction en réflexion (voir Figure 3.15), dont le comportement dépend forcément de l'angle d'incidence. Les réponses angulaires obtenues ne sont effectivement pas plates, avec une nette décroissance pour $|\theta| > 25^\circ$, comme le montre la Figure 3.16. Afin d'interpréter les mesures obtenues, nous avons développé un modèle macroscopique [Ribet-Mohamed *et al.*, 2005b] décomposant le processus de détection en trois étapes successives : transmission par l'interface air/semi-conducteur (étape 1 sur la Figure 3.15), diffraction par le réseau de couplage (étape 2), puis absorption par les puits quantiques (étape 3). Chacune de ces étapes dépend de l'angle d'incidence. Cette approche complètement analytique a permis d'interpréter les résultats obtenus : la décroissance du signal observée sur la Figure 3.16 pour des angles d'incidence supérieurs à 25° correspond au moment où un des ordres diffractés par le réseau devient évanescent. La chute du facteur de transmission de l'interface air/semi-conducteur quand on

se rapproche de l'incidence normale est vraisemblablement masquée par un effet d'ombrage dû au support du composant (apparaissant pour $\theta < -65^\circ$ et $\theta > 75^\circ$). Une des conclusions de cette étude est que la profondeur de gravure n'influence pas (ou peu) la réponse angulaire, contrairement à la période du réseau.

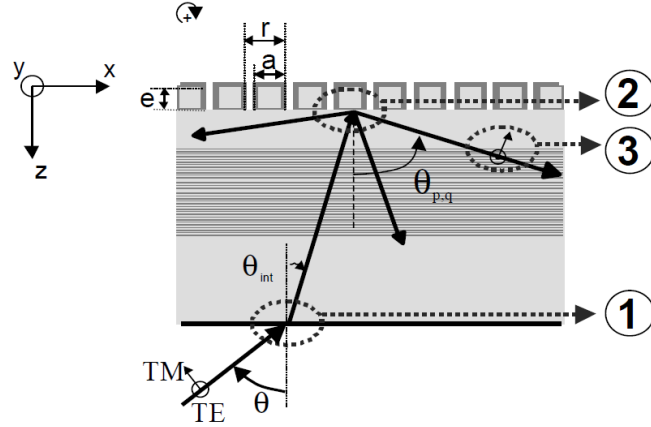


FIGURE 3.15 – Coupe d'un pixel éclairé en face arrière (cas de la configuration matricielle). Les différentes étapes de la modélisation sont représentées : 1 : transmission à l'interface air-GaAs, 2 : diffraction par le réseau, 3 : Absorption de la composante selon z du champ.

En parallèle de ces travaux à l'ONERA, l'équipe du III-V Lab a pour sa part commencé à mettre en place un modèle de type éléments finis. Cette approche, complémentaire de celle développée à l'ONERA, a l'avantage de prendre en compte les effets de taille finie des pixels [De Rossi *et al.*, 2003] mais demande un temps de calcul assez long, à cause de la structure en trois dimensions des pixels.

Notons que dans le cadre de la thèse de Judikaël Le Rouzo, nous avons aussi travaillé avec Yann Boucher à la description théorique de l'effet de biréfringence de forme exaltée dans les milieux multicouches anisotropes [Boucher *et al.*, 2006, 2008]. Cette description s'applique notamment aux empilements des détecteurs MPQ, puisque chaque puits peut être considéré comme une couche uniaxiale, et chaque barrière comme un matériau isotrope.

Signalons également que pour interpréter les mesures de réponses angulaires réalisées sur des détecteurs matriciels HgCdTe, un autre modèle tout analytique, reposant sur le formalisme de la matrice de transfert a été développé (toujours dans le cadre de la thèse de Judikaël Le Rouzo et en collaboration avec Yann Boucher). Là encore, une très bonne correspondance entre la théorie et l'expérience a été obtenue [Le Rouzo, 2007].

3.2.2 Modélisation du transport électronique dans les détecteurs à multipuits quantiques

Les applications d'imagerie infrarouge faibles flux requièrent des détecteurs infrarouge performants dans la bande spectrale VLWIR, c'est-à-dire avec des

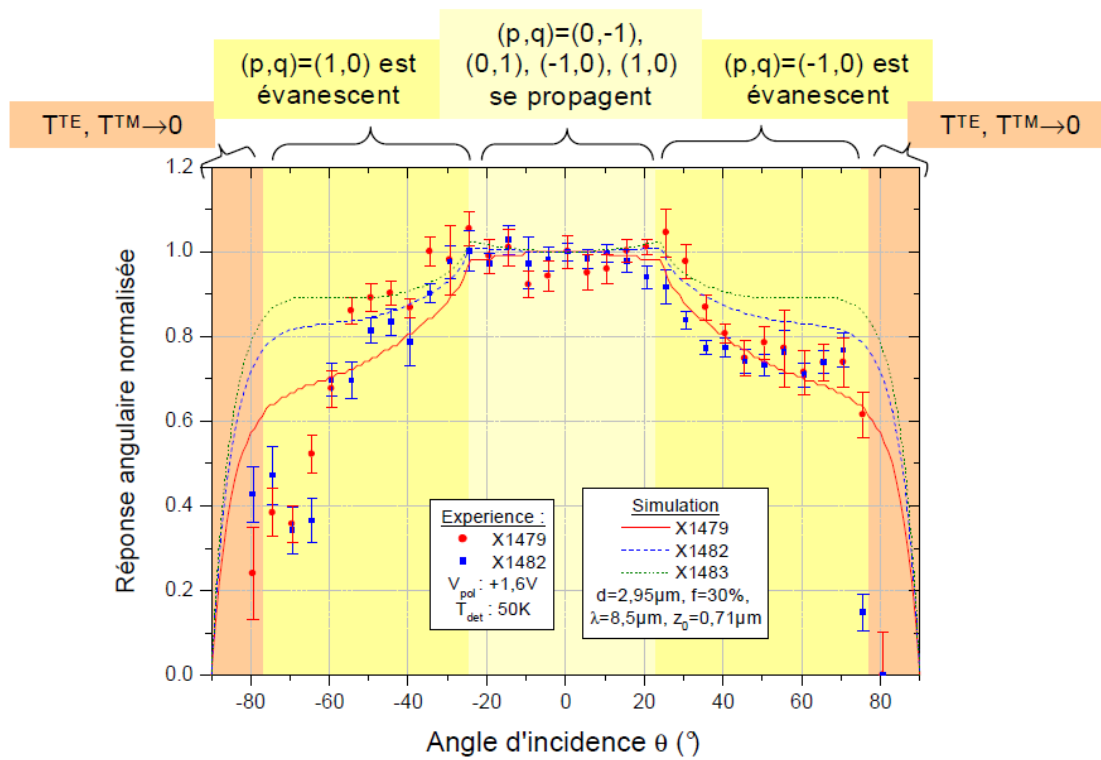


FIGURE 3.16 – Comparaison de la réponse angulaire expérimentale et des résultats de la simulation pour différentes valeurs de la profondeur de gravure du réseau e (mesures obtenues sur des détecteurs multipuits quantiques « faible bruit » de l'institut Fraunhofer-IAF ; X1479 : $e = 1\mu\text{m}$, X1482 : $e = 0,8\mu\text{m}$, X1483 : $e = 0,6\mu\text{m}$).

longueurs d'ondes de coupures supérieures à $12\mu\text{m}$. Au début des années 2000, peu de filières de détecteurs étaient capables d'adresser ce domaine spectral : HgCdTe (avec des difficultés liées au matériau qui se traduisent par une dégradation des performances électro-optiques quand la longueur d'onde de coupure augmente), Si :Ga et Si :As (filières américaines sur lesquelles nous n'avons que très peu d'informations), et la filière multipuits quantiques. Dans notre démarche d'orientation de cette dernière filière, nous avons mesuré les performances électro-optiques de détecteurs multipuits quantiques VLWIR réalisés par le III-V Lab. Les mesures de courant d'obscurité réalisées à l'ONERA ont montré que pour une valeur de température de fonctionnement T_{lim} donnée, un plateau apparaissait dans les courbes $I(V)$, et qu'un abaissement de la température de fonctionnement en-dessous de T_{lim} ne servait à rien (voir Figure 3.17). Compte tenu des exigences liées aux applications visées, cet effet pouvait s'avérer rédhibitoire pour la filière multipuits quantiques. Nous avons donc décidé d'investiguer plus précisément l'origine physique du courant d'obscurité à très basse température de fonctionnement dans les détecteurs MPQ. Ce travail comportait une composante expérimentale, mais aussi et surtout une forte composante théorique et de modélisation, qui sortait du cœur de métier du laboratoire AIQUIDO. J'ai donc initié une collaboration académique avec l'université Paris-Diderot et le III-V Lab sur ce sujet, qui a donné lieu à la thèse de mon deuxième

doctorant, Emmanuel Lhuillier (bourse DGA 2007-2010, codirection de thèse Emmanuel Rosencher (ONERA) et Vincent Berger (Paris-VII)).

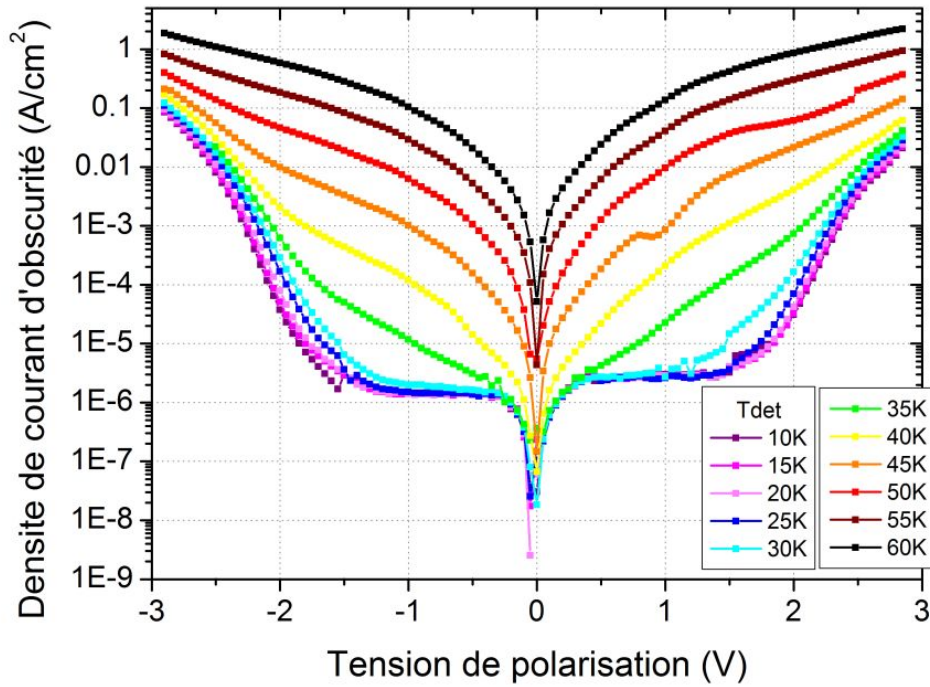


FIGURE 3.17 – Densité de courant d’obscurité mesurée sur un détecteurs à multipuits quantiques de longueur d’onde pic voisine de $15\mu\text{m}$, pour des températures de fonctionnement comprises entre 10K et 60K.

Après avoir finement caractérisé les performances d’un premier détecteur multipuits quantiques VLWIR [Lhuillier *et al.*, 2009b], Emmanuel Lhuillier a mis au point une simulation fondée sur une approche de transport par hopping (saut entre états localisés) [Lhuillier, 2010], avec prise en compte des principales interactions observées dans les puits de GaAs : phonons optiques, phonons acoustiques, désordre d’alliage, rugosité d’interface, diffusions coulombiennes avec les impuretés et entre électrons (voir Figure 3.18). Le code ainsi développé a permis d’identifier qu’à très basse température, le courant d’obscurité résultait essentiellement de l’interaction entre électrons et impuretés ionisées [Lhuillier *et al.*, 2009a], comme le montre la Figure 3.19. Ces impuretés provenant majoritairement du dopage, Emmanuel Lhuillier a proposé une structure avec un profil de dopage optimisé (en l’occurrence, avec un dopage déplacé à l’intérieur du puits quantique) [Lhuillier *et al.*, 2010b]. Une nouvelle série d’échantillons a été réalisée avec cette structure par le III-V Lab, et nous avons effectivement vérifié que le courant d’obscurité avait chuté de 50% [Lhuillier *et al.*, 2011, 2010e]. Il a également été possible de conclure sur l’origine quantique du phénomène de plateau des courbes $I(V)$: celui-ci résulte de la compétition entre la localisation des fonctions d’onde par le champ électrique et l’effet d’abaissement de barrière par ce même champ. Nous nous sommes également intéressés à l’effet des écarts

à l'idéalité des structures réalisées, notamment ceux liés aux défauts d'interface et au désordre [Lhuillier *et al.*, 2010a]. Il s'avère que les détecteurs à multipuits quantiques sont relativement robustes vis-à-vis de ces non-idéalités, puisque les modifications apportées par le désordre sont en partie compensées par celles imputables aux interfaces.

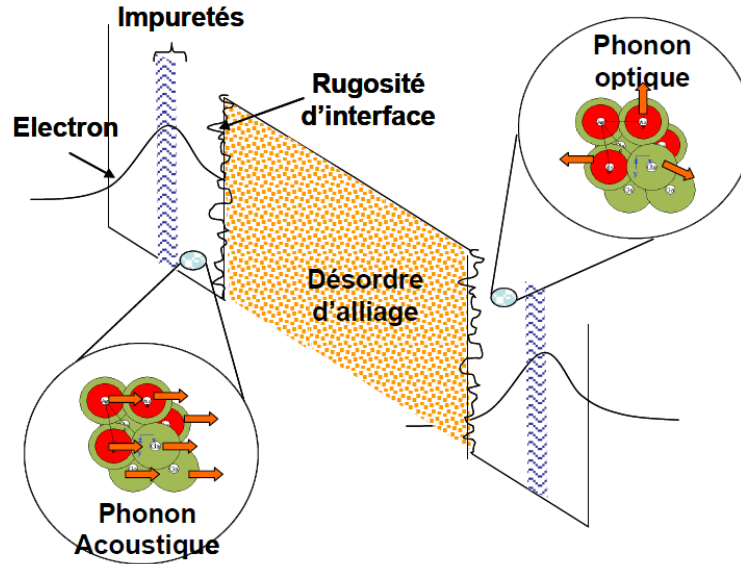


FIGURE 3.18 – Schéma des interactions prises en compte dans le modèle de transport électronique dans les détecteurs à multipuits quantiques [Lhuillier, 2010].

Plus qu'un outil pouvant prédire avec un bon accord les courbes expérimentales, le code de simulation développé est une boîte à outils quantique qui permet de relier la structure microscopique à ses propriétés de transport. Il a d'ailleurs été généralisé pour être utilisé dans une structure QCD (Détecteur à Cascade Quantique). Il a permis d'identifier l'interaction à l'origine du transport et a aussi conduit à la première estimation du $R_0 A^2$ de QCD THz [Lhuillier *et al.*, 2010d].

3.2.3 Modélisation des performances d'un instrument infrarouge

Les modèles présentés jusqu'ici contribuent à mieux comprendre la physique de la détection, et se sont avérés très utiles pour interpréter les caractérisations électro-optiques faites au laboratoire AIQUIDO ou proposer des structures optimisées aux technologues dans le cadre de nos activités d'orientation de filières émergentes. Au-delà de l'expertise détecteurs, le cœur de métier de l'équipe CIO inclut également la conception et la réalisation d'instruments infrarouge hautes performances (par exemple le radiomètre imageur aéroporté Timbre Poste ou, plus récemment, le spectro-radiomètre imageur aéroporté Sieleters [Coudrain *et al.*, 2015]). Pour ces activités, de même que pour les actions d'expertise de

2. Le $R_0 A$ correspond au produit de la résistance dynamique à tension de polarisation nulle par la surface du pixel. Cette figure de mérite est inversement proportionnelle au courant d'obscurité quand celui-ci est limité par la diffusion ou les générations-recombinaisons.

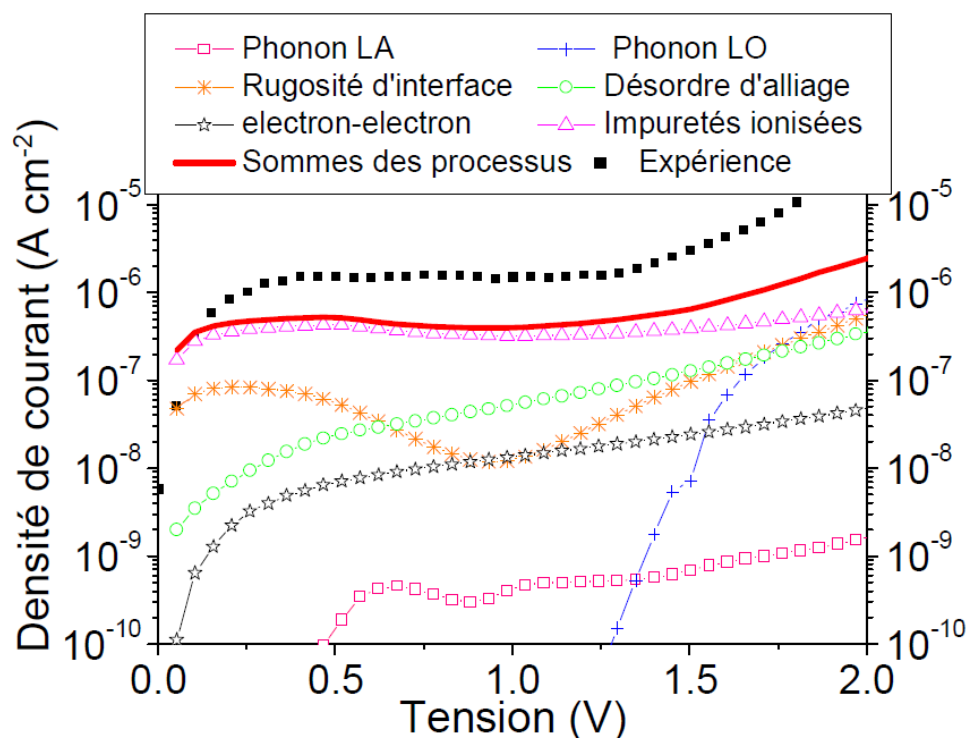


FIGURE 3.19 – Résultat de la modélisation : densité de courant en fonction de la tension appliquée pour les six processus considérés. La courbe théorique (en rouge), somme de ces processus, peut être comparée à la courbe expérimentale (en noir et pointillé). Calculs et mesures faits à 10K [Lhuillier, 2010].

systèmes optroniques, il est indispensable de pouvoir prédire les performances d'un instrument infrarouge complet. Pour ce faire, Jérôme Primot (ONERA/-DOTA) a développé, à la fin des années 90, un modèle tout analytique nommé PlanFoc. Celui-ci prend en compte toutes les briques constitutives d'un système optronique (voir Figure 3.20) : scène, atmosphère, optique et détecteur, en incluant les contraintes systèmes (par exemple stabilisation de la ligne de visée). Ce code de calcul a été recalé par rapport aux outils des principaux industriels français du domaine.

Petit à petit, les collègues de l'équipe CIO utilisant PlanFoc l'ont adapté à leurs propres besoins, par exemple en incluant une description plus fine de l'atmosphère, ou en incluant des cibles particulières. Pour ma part, j'ai travaillé sur la brique détecteur qui, à l'origine, considérait uniquement la filière HgCdTe. J'y ai introduit de nouvelles filières comme les détecteurs à multipuits quantiques ou les détecteurs à super-réseau. La démarche est alors complètement différente de celle décrite précédemment : il ne s'agit plus de décrire le plus finement possible la physique de la détection, mais au contraire de prédire de façon macroscopique le signal et le bruit en sortie du détecteur pour une gamme de conditions de fonctionnement la plus large possible. Pour ce faire, les formules littérales utilisées sont recalées par rapport aux résultats des caractérisations électro-optiques menées au laboratoire AIQUIDO. Ce travail m'a ainsi permis d'évaluer le potentiel des détecteurs multipuits quantiques pour adresser des

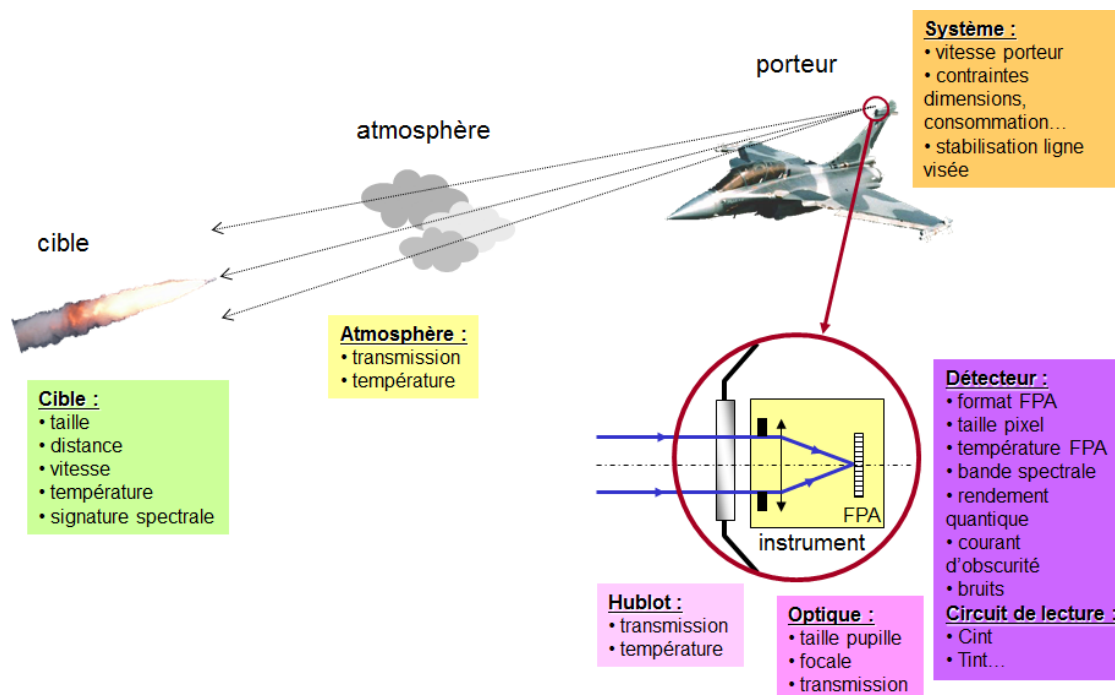


FIGURE 3.20 – Schéma de principe du modèle de performances PlanFoc développé par J. Primot.

applications très faibles flux. Ces applications relèvent généralement de la défense, mais je présente ici un cas purement académique [Lhuillier *et al.*, 2010c]. L'équipe CIO a en effet réalisé, dans les années 90, une caméra sur mesure pour la soufflerie cryogénique ETW (European Transonic Windtunnel). Cette soufflerie a la particularité de générer des écoulements avec des nombres de Reynolds très élevés (écoulements turbulents), représentatifs des phases de décollage ou d'atterrissage des avions. Techniquement, ces conditions sont obtenues grâce à un écoulement très froid. La température de la maquette est ainsi de 120K en moyenne, et la transition laminaire/turbulent correspond à une élévation de température de 1K seulement (voir Figure 3.21). Développer une caméra capable de résoudre une aussi faible variation de température sur fond froid était donc un vrai challenge. La solution retenue par l'équipe CIO a parfaitement répondu au cahier des charges, comme le montre la figure Figure 3.22. Cette caméra, nommée Crystal, reposait sur une matrice Si :Ga réalisée par le CEA/-LETI (qui travaillait à l'époque sur cette filière) et fonctionnant à 10K. Le format était de 192×128 pixels, et le pas pixel de $75\mu\text{m}$. Dans ces conditions, il n'était pas possible de visualiser la totalité de la maquette (40cm d'envergure) tout en ayant une résolution suffisante pour étudier la transition laminaire/turbulent. Il a donc été nécessaire d'utiliser une optique à deux voies distinctes : grand champ et petit champ (zoom). Cette optique était entièrement refroidie pour réduire le fond instrumental, ce qui impliquait une grande complexité expérimentale.

A la fin des années 2000, la faisabilité de matrices MPQ VLWIR de la classe 512×512 pixels était acquise. J'ai donc cherché à déterminer, grâce au logiciel

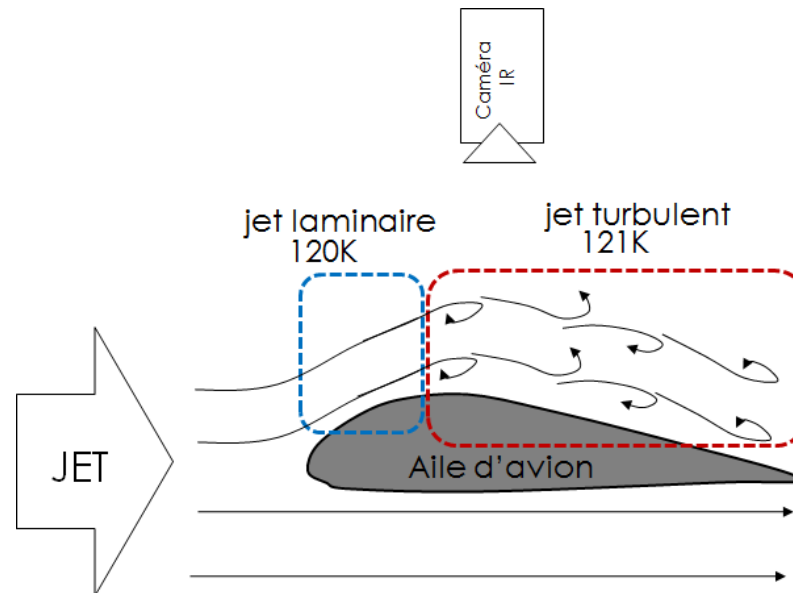


FIGURE 3.21 – Principe d’opération de la caméra Crystal dans la soufflerie cryogénique.

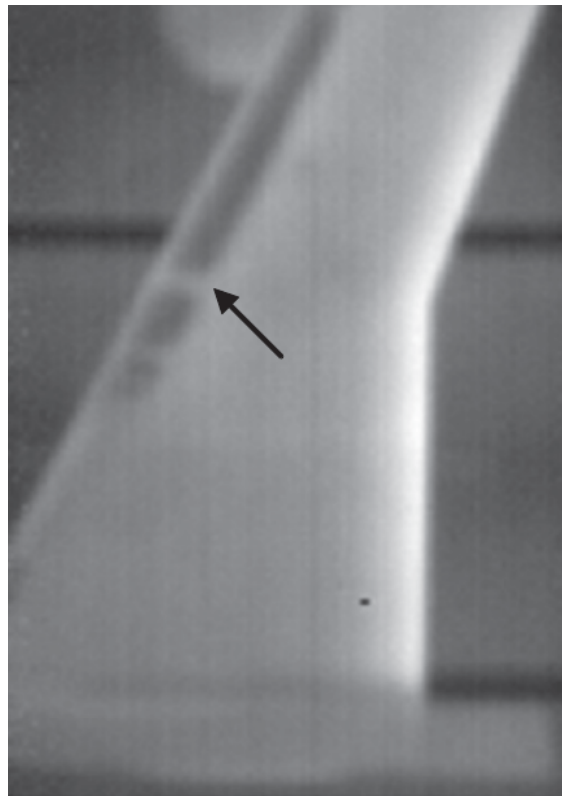


FIGURE 3.22 – Exemple d’image obtenue par la caméra Crystal : la flèche noire indique la pastille générant la transition laminaire/turbulent, qui est effectivement bien résolue par la caméra.

PlanFoc modifié, si une telle matrice permettrait de réaliser une caméra de type Crystal. La [Figure 3.23](#) montre les résultats obtenus : pour une température de fonctionnement de 30K, on a une NETD (Noise Equivalent Temperature Difference, ou encore différence de température équivalente au bruit) inférieure à 150mK, ce qui est suffisant pour résoudre la transition laminaire/turbulent

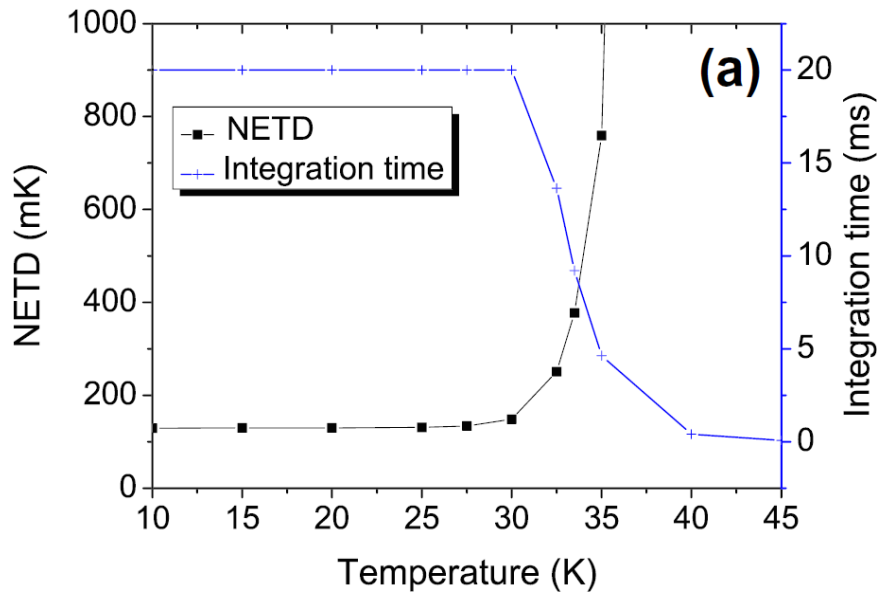


FIGURE 3.23 – Résultat de la modélisation des performances d’une caméra de type Crystal à base de détecteurs multipuits quantiques : à gauche, NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) en fonction de la température de fonctionnement ; à droite : temps d’intégration correspondant.

de 1K. Au-dessus de 30K, le courant d’obscurité augmente très fortement (passage du régime tunnel au régime thermoïonique), obligeant à diminuer le temps d’intégration pour ne pas saturer la capacité d’intégration. C’est très défavorable pour le rapport signal à bruit, et cela se traduit par une augmentation rapide de la NETD. En conclusion, l’utilisation d’une matrice MPQ permettrait d’augmenter la température de fonctionnement du détecteur de 10K à 30K, ce qui simplifierait considérablement la cryogénie. De plus, les formats aujourd’hui disponibles permettraient de n’avoir plus qu’une seule voie optique, ce qui, là encore, simplifierait énormément l’instrument. Ce travail de modélisation a également montré que le bruit dominant était toujours celui lié au courant d’obscurité, confirmant ainsi la pertinence de la démarche mise en place dans la thèse d’Emmanuel Lhuillier : il est bien primordial de réduire le courant d’obscurité en régime tunnel.

Dans le cadre d’activités contractuelles, j’ai également contribué à définir une base de scénarii opérationnels représentatifs permettant d’évaluer le potentiel d’une filière de détecteurs donnés. Enfin, pour mes activités d’enseignement, j’ai développé une version simplifiée du logiciel PlanFoc, sous Labview, qui permet de montrer la logique du dimensionnement d’un système infrarouge (voir [Figure 3.24](#)).



FIGURE 3.24 – Modèle PlanFoc simplifié développé sous Labview pour mes actions d’enseignement liées aux systèmes optroniques. En haut : bilan radiométrique ; en bas : bilan en FTM. Cas de la caméra Crystal avec un détecteur MPQ VLWIR.

EXEMPLE CONCRET D'ORIENTATION DE FILIÈRE ÉMERGENTE : LA FILIÈRE SUPER-RÉSEAU

Sommaire

4.1	Démarche mise en place	35
4.2	Focus sur les actions les plus marquantes	38
4.2.1	Thèse de Cyril Cervera : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs à super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure symétrique	38
4.2.2	Post-doc de Katarzyna Jaworowicz : Mesures de courant d'obscurité et premières mesures de bruit sur détecteurs à super-réseau	39
4.2.3	Thèse de Rachid Taalat : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée	40
4.2.4	Thèses de Marie Delmas, d'Edouard Giard et de Julien Imbert : réalisation, caractérisation et modélisation de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée	44
4.3	Conclusion sur le potentiel de la filière super-réseau InAs/GaSb pour le domaine MWIR en 2015	50
4.4	Projet	57

L'ONERA s'est intéressé aux détecteurs à super-réseau de type II dès le début des années 2000. A cette époque, ils étaient présentés dans la littérature comme une alternative aux détecteurs à multipuits quantiques. Nous y avons vu, plus généralement, une alternative potentiellement intéressante aux filières bien établies, aussi bien en bande 3 – 5 μ m qu'en bande 8 – 12 μ m. J'ai eu la chance d'être chargée de piloter l'orientation de cette filière émergente, ce qui m'a donné l'occasion de mettre en place une démarche scientifique sur le long terme, qui s'articule autour de la collaboration nouée avec l'équipe IES (Institut d'Electronique et des Systèmes) de l'université de Montpellier.

4.1 DÉMARCHE MISE EN PLACE

En 2005, l'ONERA a pris contact avec l'université de Montpellier, où Jean-Baptiste Rodriguez venait de finir sa thèse [Rodriguez, 2005] visant à concevoir, réaliser par épitaxie par jets moléculaires (EJM) et caractériser des structures photodétectrices à super-réseau InAs/GaSb. Lors de ces premières discussions, nous avons identifié que les performances électro-optiques des détecteurs à super-réseau étaient souvent masquées par des problèmes de courants de fuite surfaciques. Il convenait donc de mener une action de type « levée de point dur

» consacrée à la passivation de ces détecteurs. J'ai pour cela obtenu un financement REI (recherche exploratoire et innovante) de la DGA, qui a permis de faire travailler l'IES, le CEA/LETI et l'ONERA sur le sujet pendant 18 mois. Les résultats de cette première étude ont été spectaculaires : en l'espace de quelques mois, le courant d'obscurité a été réduit de 5 ordres de grandeur pour des détecteurs à super-réseau MWIR, grâce à une optimisation de la gravure et de la passivation menée à l'IES (voir paragraphe 4.2.1). Nous avons donc conclu que la passivation n'était pas un point de blocage rédhibitoire, mais juste une difficulté d'ordre technologique. Ces premiers résultats, associés à notre analyse bibliographique et à notre connaissance des applications opérationnelles (notamment grâce aux travaux d'expertise des programmes DGA menées par Joël Deschamps et Jérôme Primot (ONERA/DOTA)) nous ont convaincus que la filière super-réseau pouvait effectivement être intéressante dans deux domaines spectraux différents : MWIR ($3 - 5\mu\text{m}$) et LWIR-VLWIR ($> 8\mu\text{m}$). Dans le domaine MWIR, les deux filières les plus performantes étaient à l'époque HgCdTe (excellent rendement quantique, température de fonctionnement de la classe 90K) et InSb (excellent rendement quantique également, excellente uniformité et très bonne stabilité dans le temps des corrections, mais température de fonctionnement à 77K). La filière super-réseau pouvait ainsi présenter un compromis intéressant, alliant fort rendement quantique et température de fonctionnement plus élevée que 90K (domaine appelé « HOT » MWIR pour High Operating Temperature), le tout avec une bonne uniformité. Dans le domaine LWIR-VLWIR, les deux filières disponibles en France étaient HgCdTe (avec des difficultés liées au matériau qui apparaissaient avec l'augmentation de la longueur de coupure, se traduisant par une dégradation des performances) et les détecteurs MPQ (avec la possibilité de réaliser de grandes matrices très uniformes, mais un rendement quantique plus faible et une température de fonctionnement plus faible que HgCdTe). Là encore, les détecteurs à super-réseau pouvaient potentiellement constituer un compromis intéressant.

Nous avons donc décidé de mettre en place les actions nécessaires pour statuer sur le potentiel de la filière super-réseau, d'une part dans le domaine HOT MWIR, et d'autre part dans le domaine LWIR-VLWIR. La Figure 4.1 et la Figure 4.2 donnent une vision d'ensemble de l'enchaînement de ces actions, certaines ayant eu un cadre contractuel (expertise pour la DGA, étude ANR et projet Carnot) et d'autres un cadre académique (thèses et post-docs). Notons que l'essentiel des actions menées jusqu'en 2015 a eu pour objet le domaine spectral MWIR, qui était plus facilement accessible d'un point de vue technologique. Mais nous avons veillé à ce que nos conclusions soient, autant que possible, transposables au domaine LWIR-VLWIR, avant de l'adresser réellement à partir de 2015.

D'un point de vue contractuel, nos travaux ont tout d'abord bénéficié d'une synergie avec les actions liées à la « plasmonique » lancées par Riad Haïdar à cette époque, notamment le projet ANR INTREPID (INTégration de RÉsonateurs pour la Photodétection Infrarouge quadiChromique)¹ et le projet Carnot

1. Le projet ANR INTREPID a été coordonné par le CEA/LETI. Il a associé SOFRADIR, ainsi que des laboratoires de l'ONERA/DOTA, le CNRS/LPN et le CNRS/IES.

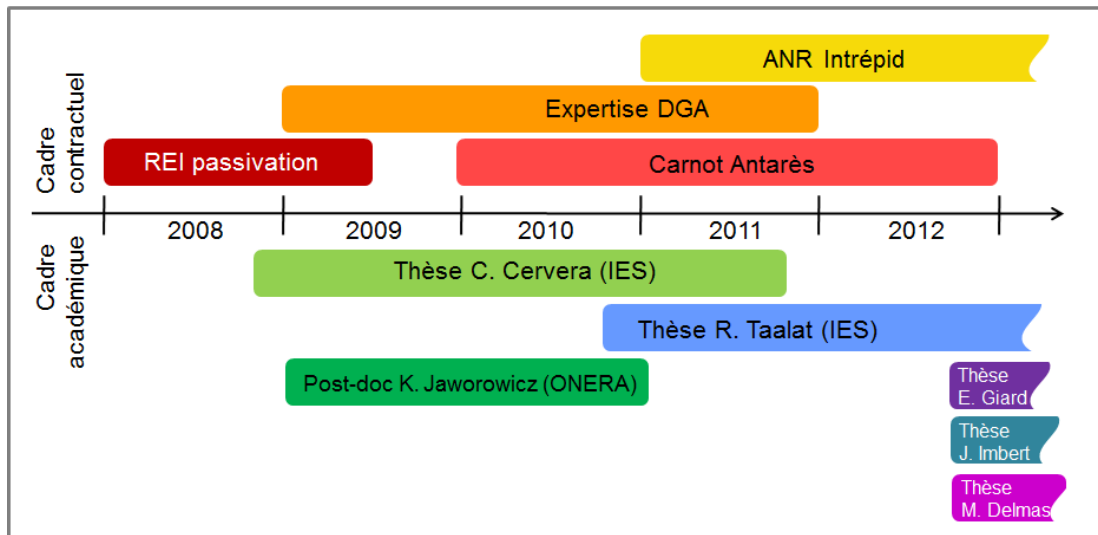


FIGURE 4.1 – Actions mises en place pour l’orientation de la filière émergente super-réseau (2008-2012).

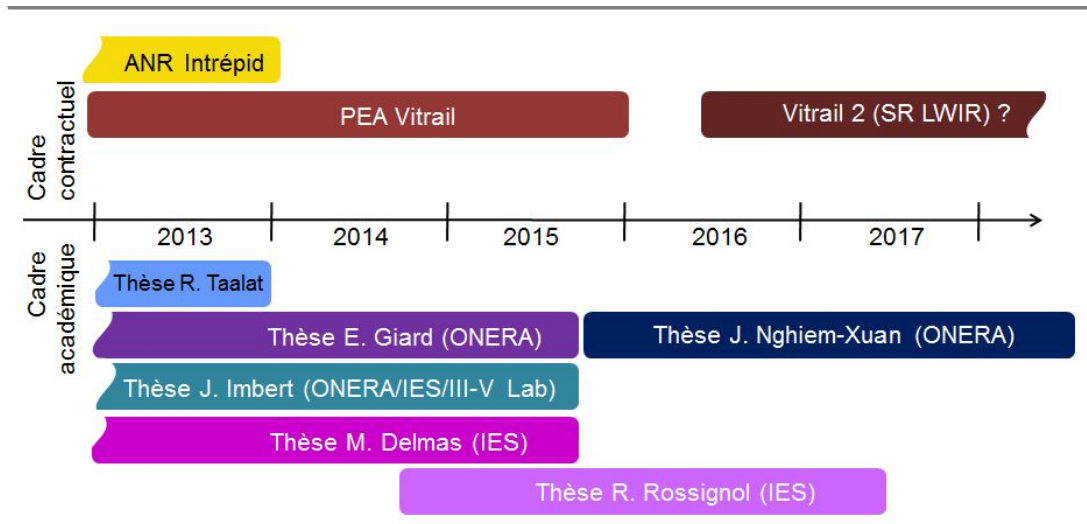


FIGURE 4.2 – Actions mises en place pour l’orientation de la filière émergente super-réseau (2013-2017).

ANTARES (ANTennes A RESonances de plasmons)². Ces deux projets avaient pour objectif l’amélioration des performances électro-optiques des détecteurs, grâce à des résonances de plasmons prenant naissance dans des nanostructures métalliques intégrées au détecteur. Dans ces deux projets, la filière super-réseau a été retenue comme vecteur pour les démonstrations expérimentales (avec la filière HgCdTe pour le projet INTREPID, et avec la filière microbolomètres pour le projet ANTARES). Le projet INTREPID a notamment permis de réaliser la

2. Le projet Carnot ANTARES a associé l’ONERA, le CNRS/LPN et le CNRS/IES.

toute première matrice super-réseau française (voir paragraphe 4.2.3). Toujours d'un point de vue contractuel, nos travaux ont aussi bénéficié d'un soutien de la DGA à travers une action d'expertise récurrente, qui a notamment financé un « coup de sonde » dans le domaine spectral LWIR.

Pour ma part, j'ai contribué à lancer les actions académiques mentionnées Figure 4.1 et Figure 4.2, en collaboration avec Philippe Christol et Jean-Baptiste Rodriguez de l'université Montpellier. Nous avons mis en place le schéma de fonctionnement suivant :

- réalisation des détecteurs à super-réseau et premiers tests électro-optiques à l'IES,
- caractérisation fine de leurs performances à l'ONERA,
- analyse en commun des résultats obtenus, et orientation des futurs développements.

L'IES a ainsi lancé en 2008 la thèse de Cyril Cervera, à laquelle j'ai été associée en tant que co-directrice de thèse. L'objectif de cette thèse était d'établir le protocole technologique de fabrication des photodiodes PiN à super-réseau pour un fonctionnement dans le MWIR (voir paragraphe 4.2.1). En parallèle, j'ai recruté et encadré Katarzyna Jaworowicz pour un post-doc de 2 ans à l'ONERA, dont l'objectif était de caractériser finement les détecteurs réalisés par Cyril Cervera (notamment mesures de courants d'obscurité et de bruit, cf paragraphe 4.2.2). A l'IES, la thèse de Cyril Cervera a été suivie par celle de Rachid Taalat (bourse DGA 2010-2013), à laquelle j'ai été à nouveau associée comme co-directrice de thèse. Un des principaux résultats de cette seconde thèse a été la réalisation de la première matrice super-réseau française (voir paragraphe 4.2.3). Nous avons ensuite décidé de monter en puissance en élargissant le consortium (avec l'arrivée du III-V Lab) et en lançant, fin 2012, trois thèses liées : celle de Marie Delmas à l'IES (réalisation de détecteurs, premières caractérisations et modélisation TCAD (Technology Computer-Aided Design) sous « Silvaco »), celle d'Edouard Giard à l'ONERA (caractérisation fine et modélisation macroscopique, voir 4.2.4) et celle de Julien Imbert à l'ONERA et au III-V Lab (modélisation fine du transport électronique). L'objectif était de pouvoir émettre fin 2015 un avis d'expert sur le potentiel réel de la filière super-réseau pour adresser les applications HOT MWIR (voir paragraphe 4.3).

4.2 FOCUS SUR LES ACTIONS LES PLUS MARQUANTES

4.2.1 Thèse de Cyril Cervera : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs à super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure symétrique

A la fin de la thèse de Jean-Baptiste Rodriguez [Rodriguez, 2005], l'IES maîtrisait la croissance par EJM des empilements multicouches à super-réseau en accord de maille sur le substrat GaSb. Par contre, les photodiodes fabriquées à partir de ces structures présentaient systématiquement des performances électriques médiocres à basse température et à l'obscurité, signature de la présence de courants de fuite de surface. Ces courants néfastes étaient engendrés soit par un mauvais contrôle de la gravure des couches, soit par une absence de

protection efficace des surfaces des composants. La thèse de Cyril Cervera a donc été lancée (bourse DGA 2008-2011, directeur de thèse : Philippe Christol, co-direction de thèse : Jean-Baptiste Rodriguez et moi-même), en complément de l'étude REI financée par la DGA, pour établir le protocole technologique de fabrication des photodiodes PiN à super-réseau pour un fonctionnement dans le MWIR.

Cyril a commencé par caractériser des structures à super-réseaux symétriques (c'est-à-dire contenant autant de monocouches (MC) d'InAs que de GaSb dans une période) réalisées par EJM. Pour cela, il a acquis et analysé des spectres de Double Diffraction de rayons X (DDX) et de photoluminescence, afin de juger de la reproductibilité et de l'homogénéité de la qualité structurale des échantillons (accord de maille par rapport au substrat) et de gap effectif (pic d'émission de photoluminescence). Ces mesures ont notamment révélé que les variations de gap observées d'une croissance à l'autre étaient dues à des fluctuations du rapport d'épaisseur entre les couches d'InAs et de GaSb. Cela a permis d'améliorer la reproductibilité du procédé de croissance de l'IES.

Cyril a ensuite mis au point le procédé de fabrication technologique des composants photodétecteurs à super-réseau à partir des structures épitaxiées. La gravure chimique des pixels est rapidement apparue comme le point clef de l'étude. Cyril a contribué à définir une solution de gravure chimique, composée d'acide phosphorique et citrique, qui a permis d'obtenir des flancs de gravure lisses et sans défauts (voir [Figure 4.3](#)). Une étape supplémentaire de passivation post-gravure à base de NaClO couplée à une simple protection par une résine polymérisée a enfin permis de supprimer totalement les courants de fuites de surface. Ce protocole technologique, stable dans le temps et reproductible d'une structure à l'autre, a permis de réduire de 5 ordres de grandeur le courant d'obscurité, avec des produits R_0A à l'état de l'art mondial ([Figure 4.4](#)) [[Cervera, 2011](#)].

Les composants ainsi obtenus ont ensuite été caractérisés d'un point de vue électro-optique [[Cervera et al., 2012](#)] [[Cervera et al., 2011](#)]. Certaines mesures ont été réalisées à l'IES (notamment mesure de dopage résiduel, mesures par effet Hall), d'autres à l'ONERA (notamment mesure de bruit sous obscurité, voir le paragraphe [4.2.2](#)). Le bilan de toutes ces caractérisations électriques et électro-optiques a conduit Cyril à proposer une structure améliorée pour le MWIR, asymétrique, dite « InAs-rich » car composée d'une période contenant plus d'InAs que de GaSb (7 MC d'InAs pour 4 MC de GaSb). En théorie, cette modification de la période du super-réseau doit diminuer la densité de porteurs intrinsèques et augmenter le recouvrement des fonctions d'ondes, ce qui devrait donc mener à une amélioration conjointe du courant d'obscurité et du rendement quantique du composant.

4.2.2 *Post-doc de Katarzyna Jaworowicz : Mesures de courant d'obscurité et premières mesures de bruit sur détecteurs à super-réseau*

Katarzyna Jaworowicz a commencé son post-doc à l'ONERA à l'époque de la thèse de Cyril Cervera et de l'étude REI sur la passivation des détecteurs à

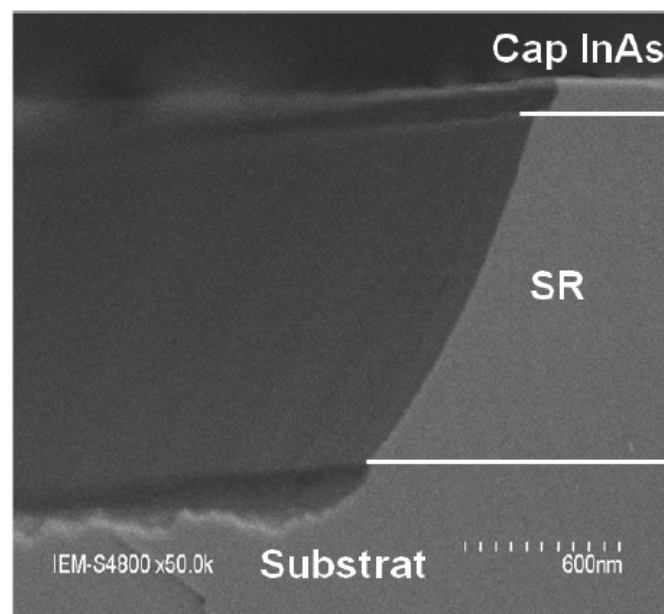


FIGURE 4.3 – Observation du flanc d’un pixel au microscope à balayage électronique (MEB), après gravure avec une solution $\text{H}_3\text{PO}_4(2)/\text{H}_2\text{O}_2(1)/\text{H}_2\text{O}(16)/\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7(0.1\text{g})$ pendant 3 minutes [Cervera, 2011].

super-réseau MWIR. Sa première mission a donc été de réaliser des mesures de courant d’obscurité en fonction de la température, et ce pour des pixels de différentes tailles, afin de déterminer si les courants de fuite avaient été efficacement supprimés. Aux plus faibles températures de fonctionnement explorées (10K), les courants d’obscurité étaient de l’ordre du femtoampèremètre, ce qui a nécessité des précautions particulières dans la mise en œuvre du banc. Les mesures de Katarzyna Jaworowicz ont révélé que le courant d’obscurité avait chuté de 5 ordres de grandeur en quelques mois [Christol *et al.*, 2010, 2011, Jaworowicz *et al.*, 2010], grâce à l’optimisation du processus de gravure/passivation décrite au paragraphe 4.2.1.

Après avoir confirmé le faible niveau d’obscurité, nous nous sommes intéressés au bruit, afin de déterminer s’il existait un bruit en excès, ou si celui-ci était bien limité par la loi théorique (formule dite de Schottky). Katarzyna Jaworowicz a ainsi participé aux premières mesures de bruit réalisées sur des détecteurs à super-réseau sous obscurité [Jaworowicz *et al.*, 2011, Ribet-Mohamed *et al.*, 2011] (voir description du banc au paragraphe 3.1.4). Nous avons montré que le bruit propre du détecteur était bien limité par la contribution Schottky théorique pour $|V_{\text{pol}}| < 0.2\text{V}$ (voir Figure 4.5), ce qui correspond aux valeurs typiques des circuits de lecture actuels.

4.2.3 Thèse de Rachid Taalat : Réalisation et caractérisation électro-optique de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée

La thèse de Rachid Taalat (bourse DGA 2010-2013, directeur de thèse : Philippe Christol, co-direction de thèse : Jean-Baptiste Rodriguez et moi-même) s’est inscrite dans la continuité de celle de Cyril Cervera, avec pour objectif

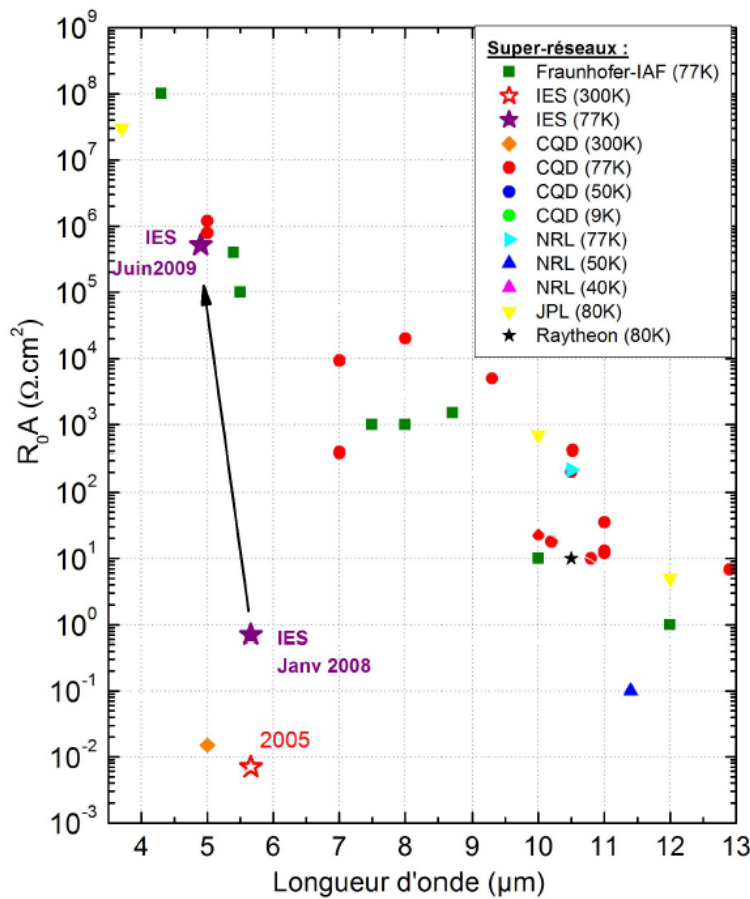


FIGURE 4.4 – Etat de l’art (2009) des détecteurs à super-réseau pour le RoA et résultats obtenus dans le cadre de la REI, entre Janvier 2008 et Juin 2009, faisant apparaître un gain de plus de 5 décades sur le produit R_0A [Cervera, 2011]. CQD = Center for Quantum Devices (USA), NRL = Naval Research Lab (USA), JPL = Jet Propulsion Lab (USA).

la fabrication, la caractérisation et l’analyse des performances de photodiodes MWIR présentant des zones actives avec des structures de périodes différentes. Rachid a ainsi réalisé des structures « InAs-rich », symétrique et « GaSb-rich » de longueurs d’onde de coupure comprises entre 4.25 et 5.5 μm . Il a ensuite comparé les courants d’obscurité mesurés sur des photodiodes PiN réalisées à partir de ces matériaux [Taalat *et al.*, 2013]. Il apparaît clairement, comme le montre la Figure 4.6, que les photodiodes présentant les valeurs de RoA les plus élevées (courants d’obscurité les plus faibles) sont celles utilisant une structure « InAs-rich », typiquement une décade meilleure que la structure symétrique servant de référence. La structure « GaSb-rich », quant à elle, mène à des courants d’obscurité une décade plus élevés que la structure symétrique [Taalat, 2013].

La présence de nombreux défauts Shockley-Read-Hall dans le super-réseau à forte proportion de GaSb semblant être à l’origine des mauvais résultats mesurés sur les diodes « GaSb-rich », Rachid s’est ensuite intéressé à une structure à super-réseau InAs/InAsSb, aussi appelée « Ga-free ». Des mesures de photoluminescence résolue en temps (TRPL) sur ce type de structures avaient en effet révélé des durées de vie de porteurs minoritaire supérieures à 412 ns dans le

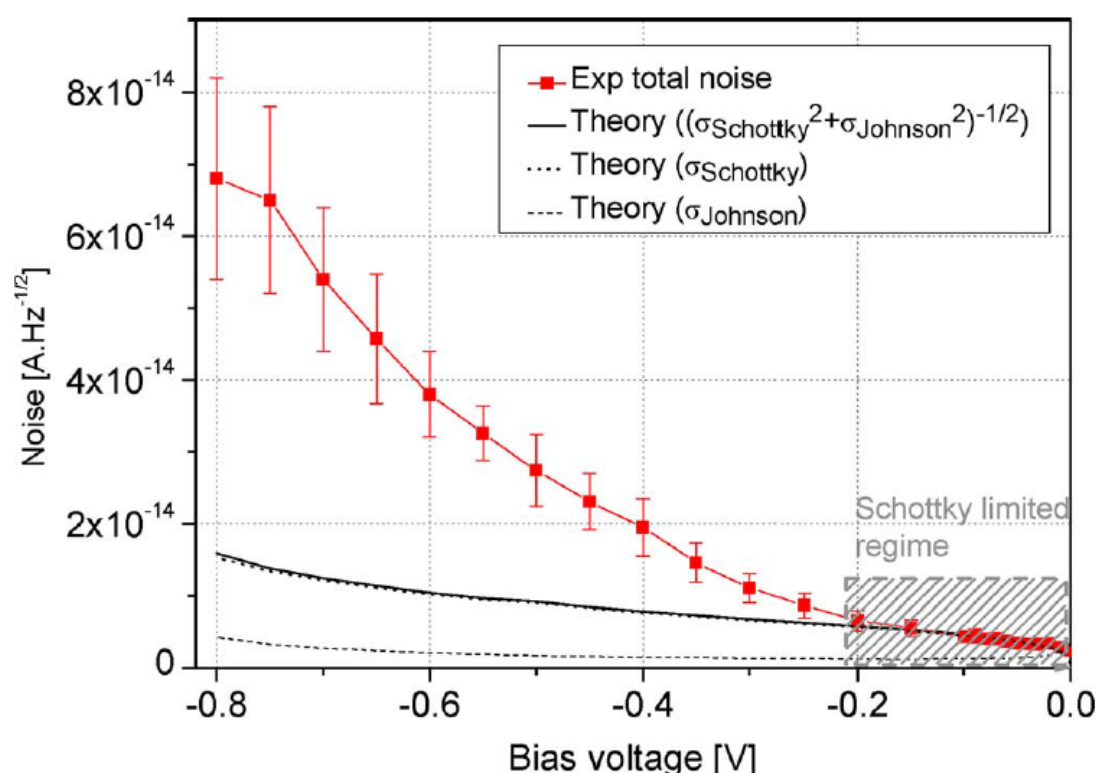


FIGURE 4.5 – Bruit total mesuré sous obscurité, en fonction de la tension de polarisation, et comparaison avec la somme quadratique des bruits Johnson (bruit thermique) et Schottky (bruit d’obscurité). Le bruit de l’amplificateur est négligeable [Jaworowicz *et al.*, 2011].

LWIR [Steenbergen *et al.*, 2011]. Malgré une bonne qualité du matériau et un bon accord de maille cristalline sur le substrat GaSb, les mesures de courant d’obscurité menées sur les composants PiN fabriqués à partir de cet échantillon ont montré des performances médiocres, rejoignant les résultats reportés à la même époque par d’autres laboratoires (attribués à des recombinaisons par effet tunnel (compte tenu des faibles discontinuités de bandes de valence et de conduction pour le système InAs/InAsSb) auxquelles s’ajoutent certainement des problèmes de passivation).

L’étude menée par Rachid a donc montré qu’au niveau du courant d’obscurité, la structure « InAs-rich » semblait la plus prometteuse. C’est donc cette structure qui a été retenue pour réaliser la première matrice super-réseau française (avec une épaisseur de zone active de 2 μm). Le travail de Rachid a consisté à étudier et optimiser chacune des étapes de la fabrication de cette matrice (notamment la gravure humide, la passivation SiO_2 et le retrait substrat) pour mettre en place un protocole adapté aux structures super-réseau en configuration matricielle. Au final, la fabrication de la matrice s’est déroulée de la façon suivante :

- croissance des couches par épitaxie par jets moléculaires à l’IES
- gravure humide, passivation SiO_2 et prise de contacts métalliques à l’IES
- découpe des puces au CNRS/LPN
- hybridation sur circuit de lecture au CEA/LETI

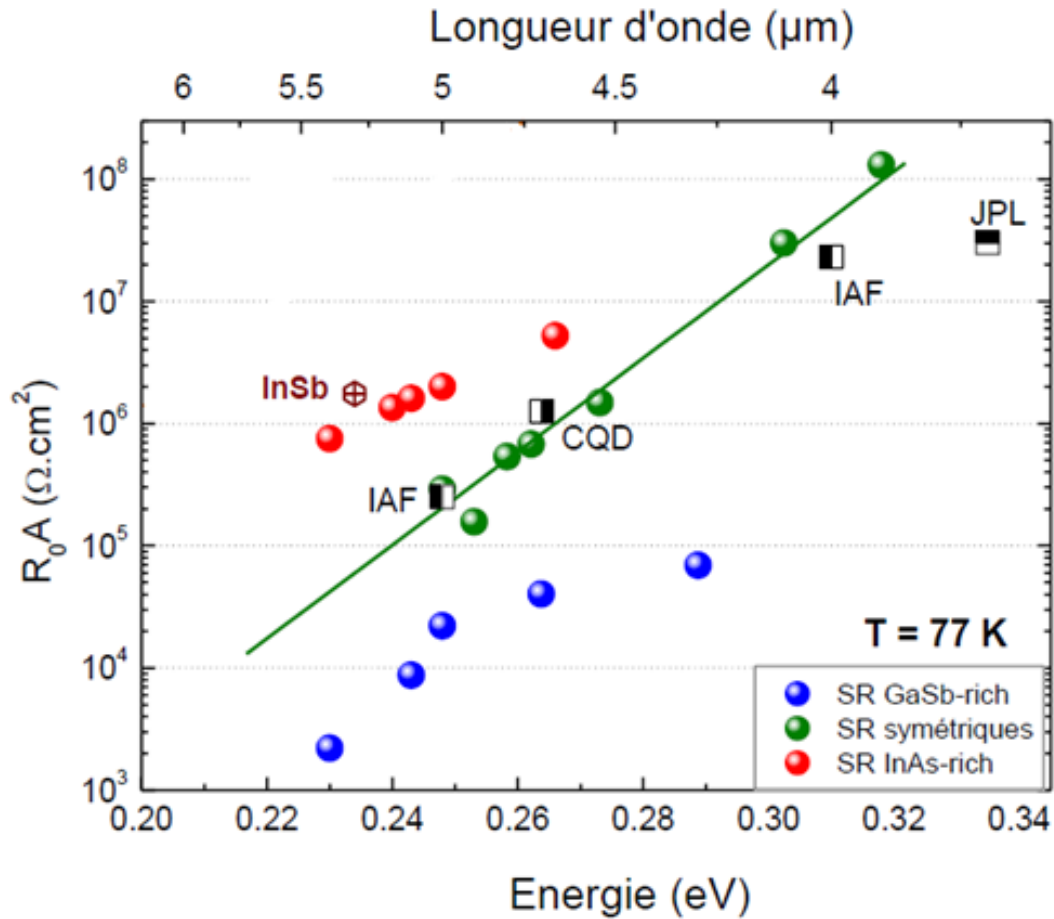


FIGURE 4.6 – RoA à 77K pour les différents détecteurs à super-réseau étudiés. Comparaison avec les performances des photodiodes PiN MWIR de la littérature et avec la filière InSb [Taalat, 2013]. IAF = institut Fraunhofer-IAF, CQD = Center for Quantum Devices, JPL = Jet Propulsion Laboratory).

- retrait du substrat à l'IES
- intégration en cryostat au CEA/LETI
- caractérisation fine à l'ONERA

Ce premier composant matriciel a donc subi cinq voyages, et parcouru un total de presque 2500 km avant d'être finalement caractérisé à l'ONERA ! La [Figure 4.7](#) montre quelques images obtenues à la mise en route de la matrice à l'ONERA. Ces images font apparaître un certain nombre de défauts, notamment sur le pourtour de la matrice. Néanmoins, ce premier résultat reste une prouesse, à ce jour non égalée par le consortium français. Les performances électro-optiques sont présentées au paragraphe [4.2.4](#).

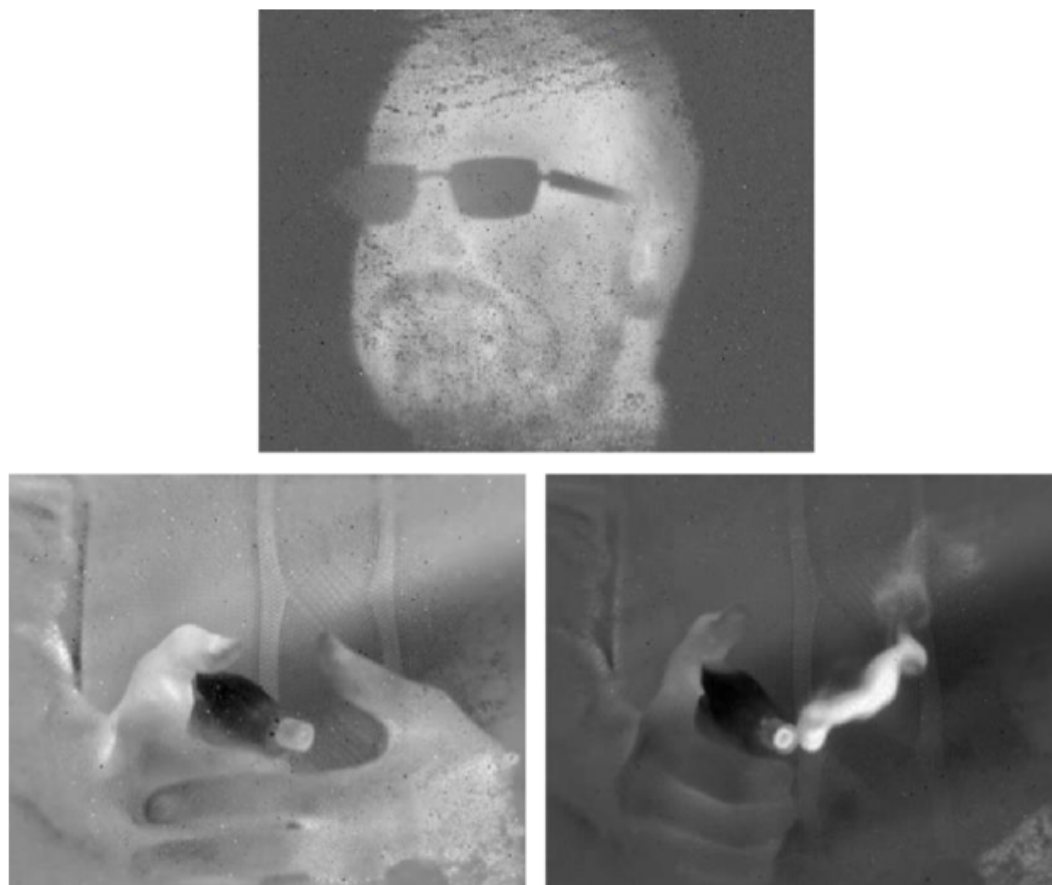


FIGURE 4.7 – Exemples d’images obtenues avec la première matrice super-réseau française [Taalat, 2013].

4.2.4 *Thèses de Marie Delmas, d’Edouard Giard et de Julien Imbert : réalisation, caractérisation et modélisation de détecteurs super-réseau InAs/GaSb MWIR à structure optimisée*

Afin d’être en mesure d’émettre en 2015 un avis d’expert sur le potentiel réel de la filière super-réseau pour adresser les applications HOT MWIR, nous avons décidé avec Philippe Christol et Jean-Baptiste Rodriguez de monter en puissance et de lancer, fin 2012, trois thèses sur le sujet des détecteurs à super-réseau :

- celle de Marie Delmas à l’IES (bourse IES 2012-2015, direction de thèse : Philippe Christol, co-direction de thèse : Jean-Baptiste Rodriguez). Cette thèse s’inscrit dans la suite de celle de Rachid Taalat, avec pour objectif la réalisation de détecteurs à super-réseau optimisés, les premières caractérisations et une modélisation des composants à l’aide de simulations TCAD (logiciel SILVACO).
- celle d’Edouard Giard à l’ONERA (bourse ONERA 2012-2015, direction de thèse : Philippe Christol, co-direction de thèse : moi-même). Cette thèse est dédiée à la caractérisation fine des détecteurs à super-réseau et à la modélisation macroscopique de leur fonctionnement.

- celle de Julien Imbert à l'ONERA et au III-V Lab (bourse DGA 2012-2015, direction de thèse : Philippe Christol, encadrante ONERA : Sophie Derelle, encadrante III-V Lab : Virginie Trinité), consacrée à la modélisation fine du transport électronique.

Ces trois thèses se sont déroulées en synergie, avec des réunions d'avancement régulières réunissant les différents acteurs et des publications en commun (notamment [Delmas *et al.*, 2014, Imbert *et al.*, 2014]). Néanmoins, je parlerai essentiellement dans ce paragraphe de celle d'Edouard Giard, dont j'ai plus particulièrement assuré le suivi et l'orientation.

La thèse d'Edouard Giard a une forte composante expérimentale. En effet, Edouard a réalisé un grand nombre de mesures électro-optiques sur des détecteurs super-réseau : monoéléments réalisés par Rachid Taalat ou Marie Delmas, et matrice réalisée dans le cadre du projet ANR INTREPID et de la thèse de Rachid Taalat. Certains des bancs de test avaient déjà été développés avant son arrivée (banc de réponse angulaire notamment). D'autres ont été adaptés ou améliorés par Edouard (banc de réponse au corps noir (voir paragraphe 3.1.3) ou de mesure de bruit (voir paragraphe 3.1.4)). Il a également intégralement développé un banc de mesure de temps de vie des porteurs minoritaires pour des échantillons super-réseau dédiés au domaine spectral MWIR (voir paragraphe 3.1.5).

Grâce à ces bancs de test, Edouard Giard a réalisé une comparaison des performances radiométriques (rendement quantique, bruit sous flux) des structures InAs-rich, symétrique et GaSb-rich. En ce qui concerne le bruit temporel, la comparaison est à l'avantage de la structure InAs-rich, dont le bruit reste limité par la contribution théorique de type Schottky pour des tensions de polarisation inverses inférieures à 1.3V, témoignant ainsi de la grande qualité cristalline et technologique des structures réalisées.

De façon assez surprenante, il est apparu que c'était la structure InAs-rich qui avait le plus faible rendement quantique à faible tension de polarisation (voir Figure 4.8). Même en augmentant cette dernière, le rendement quantique ne dépassait pas 17% à 4.5 μ m et pour une température de fonctionnement de 77K.

Le fait que le rendement quantique dépende fortement de la tension de polarisation laissait penser à un problème de collection des porteurs. Afin de mieux investiguer cet aspect, deux nouveaux échantillons InAs-rich ont été réalisés par l'IES, avec des épaisseurs de zones actives différentes (500nm et 4 μ m). Nous avons ainsi montré que c'était l'échantillon le plus épais qui présentait le plus faible rendement quantique à faible longueur d'onde (voir Figure 4.9). Un modèle tout analytique, s'appuyant sur les équations de Hovel [Aifer *et al.*, 2006, Hovel, 1975, Michel et Razeghi, 1998] a permis de statuer sur le fait que la limitation en rendement quantique était due à une faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires, à savoir les trous. Une comparaison entre expérience et théorie (voir Figure 4.9) a même permis d'estimer cette longueur de diffusion à 80nm [Giard *et al.*, 2014b].

Edouard a ensuite réalisé des mesures de temps de vie sur deux échantillons spécifiques réalisés par l'IES (échantillons constitués d'une zone active InAs-rich ou GaSb-rich entre deux barrières de confinement, sans structure PiN). Les ré-

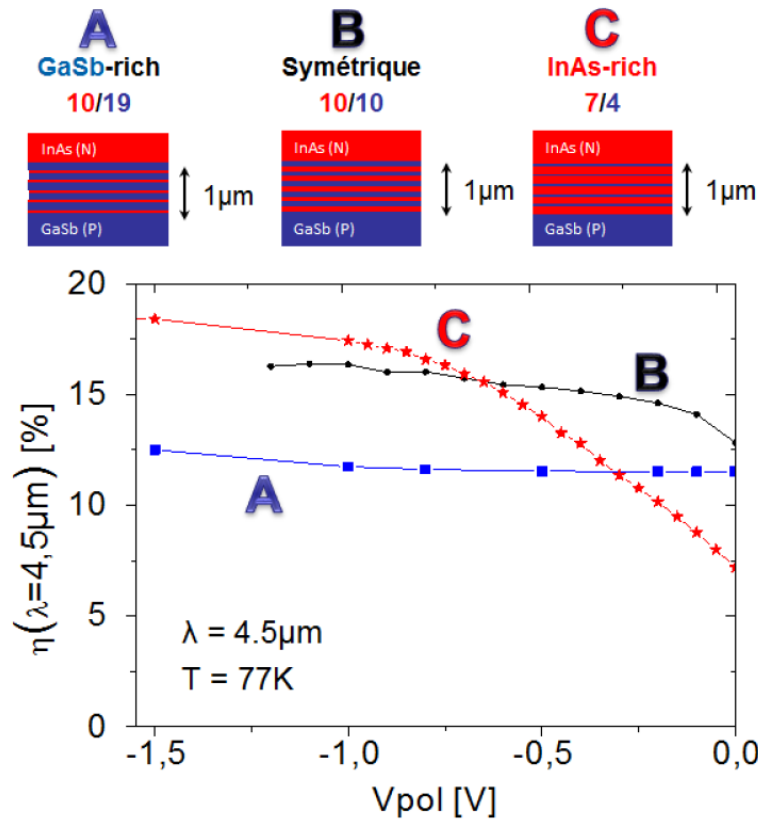


FIGURE 4.8 – Mesure de rendement quantique à une longueur d'onde de $4.5\mu\text{m}$ en fonction de la tension de polarisation. Les mesures ont été effectuées pour trois échantillons de structure de période différente (InAs-rich, symétrique et GaSb-rich) mais de même épaisseur de zone active.

sultats, à nouveau assez surprenants, sont reportés Figure 4.10b : tout d'abord, les valeurs mesurées (de l'ordre de 30ns à 40ns) sont relativement faibles par rapport à celles reportées dans la littérature (entre 40ns et 80ns pour des structures dédiées au domaine MWIR [Klein *et al.*, 2014, Murray *et al.*, 2014, Svensson *et al.*, 2010]); de plus, le temps de vie mesuré ne suit pas la décroissance attendue en $1/\sqrt{T}$ [Connelly *et al.*, 2010], où T est la température de fonctionnement; enfin, les valeurs mesurées sur l'échantillon GaSb-rich et sur l'échantillon InAs-rich sont du même ordre de grandeur, alors que l'on aurait pu s'attendre à de meilleures valeurs pour l'InAs-rich.

A ce stade, il était difficile de savoir si ces résultats surprenants étaient dûs à un problème lié à la mesure, ou au contraire à la réalisation des échantillons. Nous avons donc décidé de comparer notre banc de mesure avec d'autres bancs déjà validés. Pour ce faire, j'ai initié une collaboration avec l'équipe du CHTM (université du Nouveau-Mexique) aux Etats-Unis, en particulier avec Sanjay Krishna que j'avais rencontré à plusieurs reprises lors de conférences. Le CHTM a accepté de nous prêter les échantillons qu'ils avaient caractérisés dans une récente publication, de façon à valider notre banc. Nous leur avons également demandé de réaliser un échantillon spécifique, identique à l'échantillon InAs-rich réalisé par l'IES, afin de voir s'il pouvait y avoir eu un problème lors de la croissance. Les mesures réalisées par Edouard Giard montrent des résultats

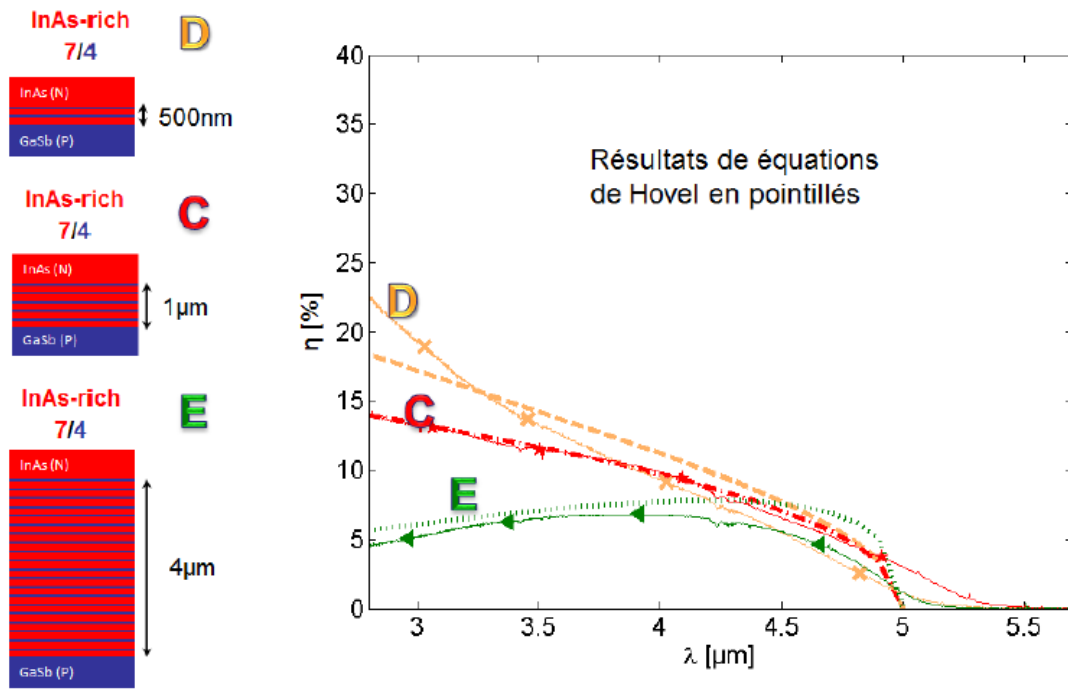


FIGURE 4.9 – Comparaison du rendement quantique spectral mesuré avec les valeurs obtenues grâce aux équations de Hovel pour trois échantillons InAs-rich 7/4 avec des épaisseurs de zone active différentes, à $V_{pol} = 0V$ et $T = 77K$. Ici L_h est prise égale à 80nm [Giard *et al.*, 2014b].

très similaires entre les échantillons censés être identiques (Figure 4.10c), ce qui montre une bonne maîtrise de la croissance dans les deux équipes. Pour ce qui est des échantillons caractérisés au CHTM et à l'ONERA, les valeurs de temps de vie mesurés diffèrent légèrement, peut-être parce que les conditions de mesure ne sont pas comparables (régime de forte injection à l'ONERA, et faible injection au CHTM), ou encore à cause de différences dans la façon d'extraire le temps de vie. Ces deux points sont en cours d'analyse avec le CHTM et l'AFRL (Air Force Research Laboratory).

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus ont permis de contribuer à l'orientation de la filière super-réseau, en émettant deux recommandations pour améliorer le rendement quantique des structures InAs-rich :

- éclairer en face arrière
- changer de porteurs minoritaires

Avec un éclairage face arrière (voir Figure 4.11), la zone d'absorption et la jonction P-N sont localisées au même endroit, maximisant ainsi la collection des porteurs photogénérés. Cette option a pu être testée grâce à la réalisation de la première matrice super-réseau française (voir paragraphe 4.2.3). En effet, les composants matriciels sont nécessairement éclairés en face arrière à cause de la présence des billes d'indium et du circuit de lecture en face avant. La Figure 4.12 montre la mesure de rendement quantique obtenue pour 600 pixels pris au centre de la matrice. Le rendement quantique moyen est de l'ordre de 40%, ce qui est effectivement plus élevé que tout ce qui avait été mesuré sur

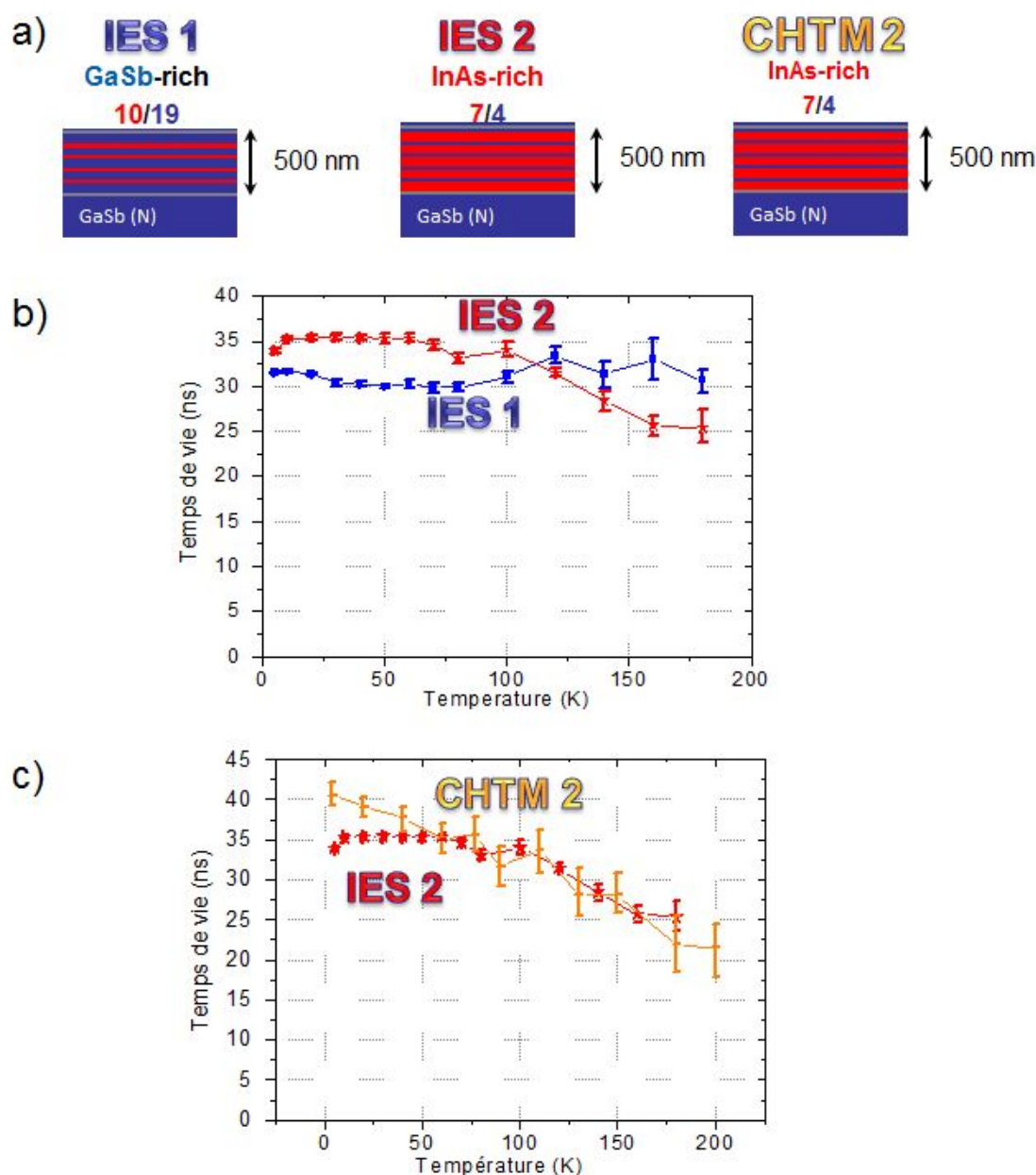


FIGURE 4.10 – Mesures de durée de vie des porteurs minoritaires en fonction de la température de l'échantillon - a) structure étudiées ; b) comparaison des structures GaSb-rich et InAs-rich réalisées par l'IES ; c) comparaison de deux structures censées être identiques, réalisées à l'IES et au CHTM [Giard, 2015].

monoélément jusque-là (typiquement 4 fois plus élevé que ce que l'on aurait pu attendre d'un monoélément avec une zone active de $2\mu\text{m}$ d'épaisseur). Cet excellent résultat est lié à l'éclairage face arrière, mais également à un double passage (réflexion sur la couche d'or en face avant), et à un dopage résiduel plus faible de la zone non intentionnellement dopée (qui tend à augmenter la zone de charge d'espace).

Changer de porteurs minoritaires, en l'occurrence utiliser des électrons à la place des trous dans notre cas, permet de bénéficier d'une longueur de diffu-

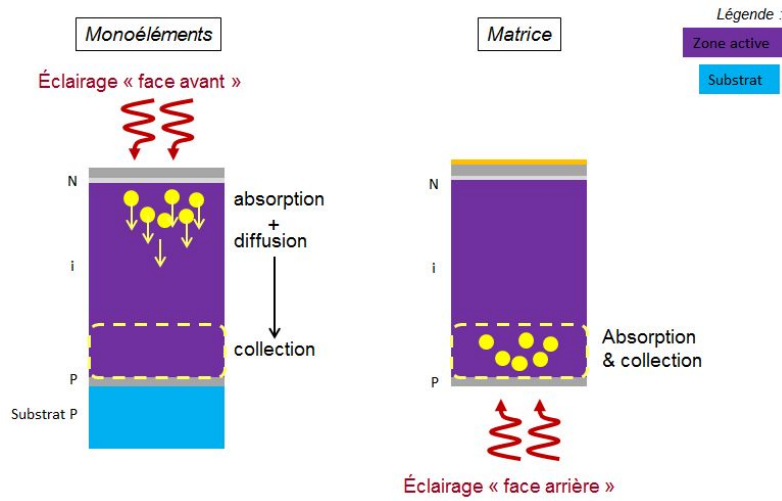


FIGURE 4.11 – Vue schématique des configurations d'éclairage par la face avant (cas des mono-éléments) et par la face arrière (cas des matrices).

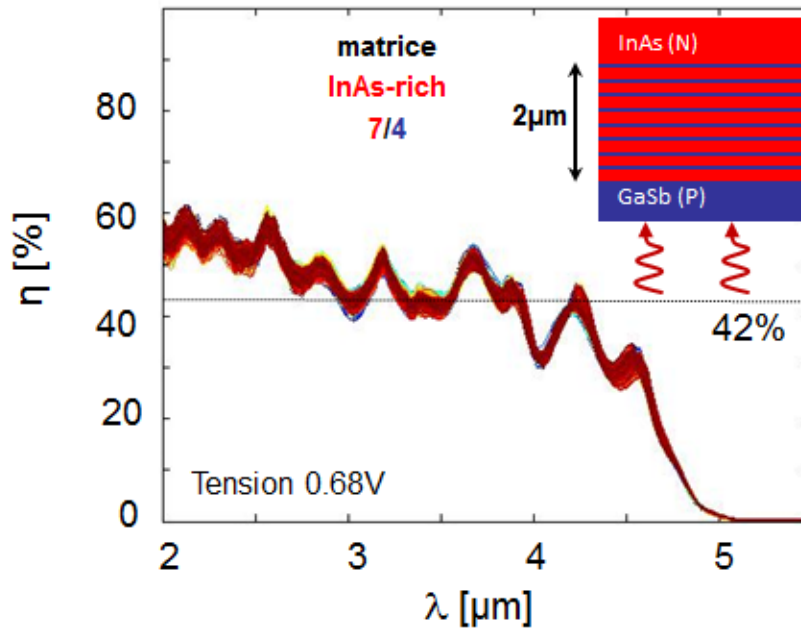


FIGURE 4.12 – Mesure du rendement quantique en fonction de la longueur d'onde pour 600 pixels pris au centre de la matrice. Les oscillations sont dues à un effet de type Fabry-Perot [Giard *et al.*, 2014b].

sion plus élevée, et là encore d'améliorer la collection des porteurs. L'IES a ainsi réalisé des monoéléments à partir d'une structure InAs-rich de 4 μm d'épaisseur, où l'InAs et le GaSb de la zone active sont dopés P (1.10^{15}cm^{-3}). La Figure 4.13 montre que le rendement quantique mesuré sur cette structure est très nettement supérieur à celui qui avait été obtenu sur une structure à zone active non dopée de même épaisseur (détecteur E), avec un rendement quantique moyen de 44% entre 3 et 5 μm , et atteignant 60% à 2 μm (contre 5% pour le détecteur E) [Giard *et al.*, 2014a]. Il s'agit du plus fort rendement quantique reporté dans la

thèse d'Edouard Giard, très proche de la limite théorique de 70% imposée par l'absence de traitement antireflet.

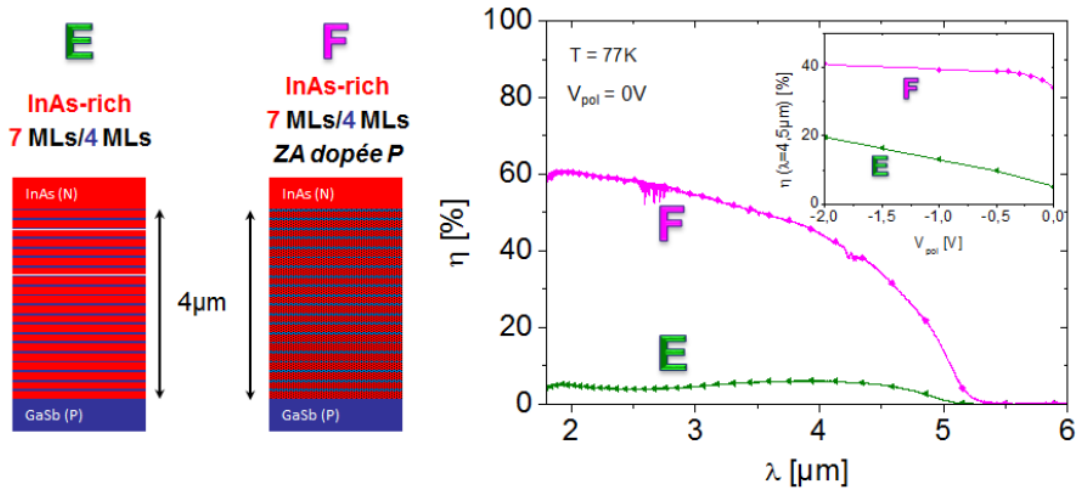


FIGURE 4.13 – Comparaison du rendement quantique spectral d’une structure InAs-rich 7/4 de zone active de $4\mu\text{m}$ d’épaisseur et dopée P (F) avec le rendement quantique spectral de la même structure sans dopage volontaire dans la zone active. En encart : même comparaison à $\lambda = 4.5\mu\text{m}$ du rendement quantique en fonction de la tension de polarisation inverse [Giard *et al.*, 2014a].

Afin de statuer sur le potentiel de la filière super-réseau pour des applications HOT MWIR, Edouard a effectué sur le détecteur optimisé F des mesures de rendement quantique en fonction de la température de fonctionnement. Celles-ci ont permis d’estimer la détectivité spécifique (voir Figure 4.14), et de déduire la température de fonctionnement BLIP, qui correspond à la température en-dessous de laquelle le bruit de photons (temporel) lié au fond est supérieur aux autres bruits (le détecteur « voyant » un fond à 300K sur $2\pi\text{sr}$). Dans le cas du détecteur optimisé F, cette température T_{BLIP} est de l’ordre de 110K (température pour laquelle la courbe expérimentale jaune tangente la limite théorique).

4.3 CONCLUSION SUR LE POTENTIEL DE LA FILIÈRE SUPER-RÉSEAU INAS/GASB POUR LE DOMAINE MWIR EN 2015

Les différents travaux menés en collaboration avec l’IES permettent d’émettre, en 2015, un avis d’expert sur le potentiel de la filière super-réseau InAs/GaSb pour le domaine MWIR ($3 - 5\mu\text{m}$). Nous avons en effet pu vérifier :

- **les niveaux de courant d’obscurité**, qui montrent qu’en soignant la gravure et en protégeant la surface avec une photorésine, il est possible de supprimer les courants de fuite surfaciques sur les monoéléments MWIR. Le passage au format matriciel a mis en évidence des difficultés liées à un changement de passivation. Néanmoins, nous jugeons qu’il ne s’agit pas là d’un point bloquant pour le domaine MWIR.

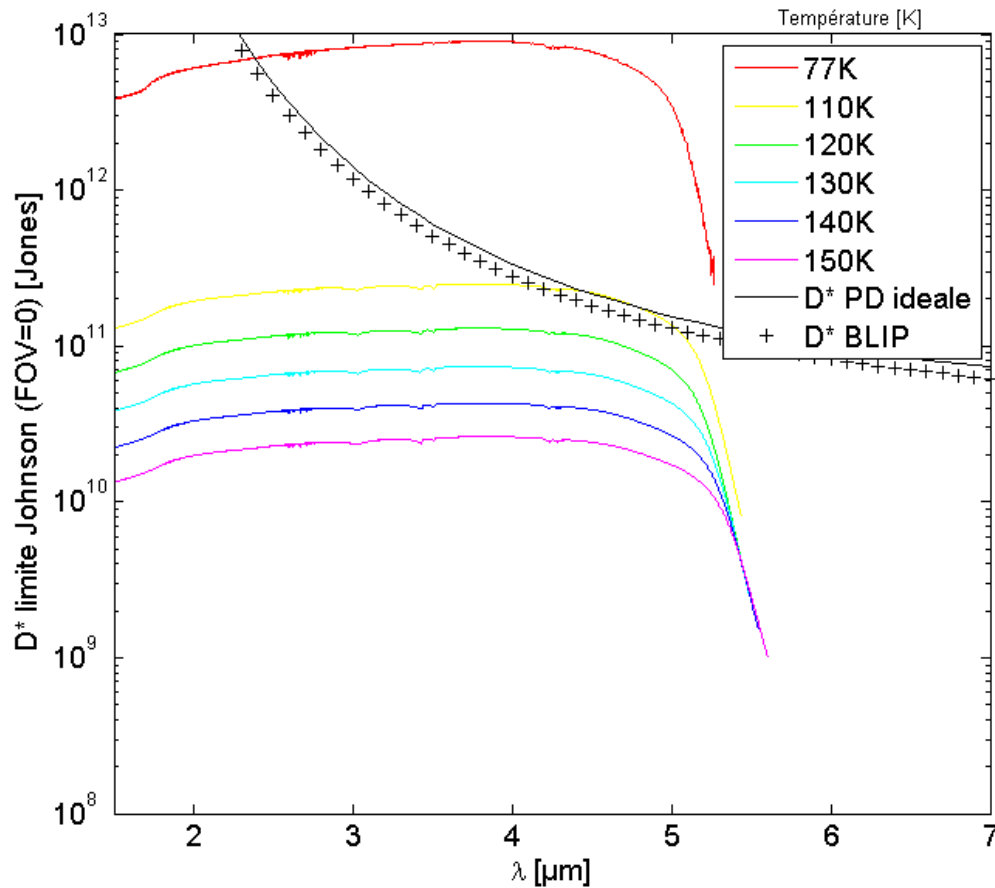


FIGURE 4.14 – Performances en D^* du détecteur super-réseau optimisé F (structure InAs-rich avec zone active légèrement dopée P, $4\mu\text{m}$ d'épaisseur). Le détecteur est BLIP à 110K (pour un fond à 300K) [Giard, 2015].

Cependant, les plus faibles courants d'obscurité mesurés à 77K sur des détecteurs InAs-rich de l'IES restent 500 fois plus élevés que l'état de l'art super-réseau [Chen *et al.*, 2015], et typiquement 5 à 6 décades au-dessus de l'état de l'art de la filière HgCdTe (donné par la Rule07 [Tennant, 2010]).

- **les niveaux de rendement quantique** : après optimisation de la structure InAs-rich, nous avons abouti à des monoéléments dont le rendement quantique maximum (60%) est très proche de la limite théorique (70% en l'absence d'antireflet), et à un composant matriciel proche de l'état de l'art mondial des détecteurs à super-réseau [Chen *et al.*, 2015] (avec un rendement quantique moyen entre 3 et $5\mu\text{m}$ de l'ordre de 40%, toujours sans traitement antireflet). Cette valeur reste un peu plus faible que celles des filières concurrentes, notamment HgCdTe (rendement quantique de 80-90% pour les composants matriciels MWIR (avec traitement antireflet)).
- **les temps de vie des porteurs minoritaires** : les valeurs mesurées à 77K dans le MWIR (de l'ordre de 30ns à 77K) sont globalement plus faibles

que celles reportées dans la littérature pour des détecteurs à super-réseau InAs/GaSb (40 à 80ns [Klein *et al.*, 2014, Murray *et al.*, 2014, Svensson *et al.*, 2010]), et surtout beaucoup plus faibles que celles reportées pour les filières concurrentes (supérieures à 5 μ s pour HgCdTe dans le MWIR [Kinch, 2000]). Rappelons que le temps de vie des porteurs minoritaires influence à la fois le courant d'obscurité et le rendement quantique. C'est certainement la raison pour laquelle, même pour la structure InAs-rich (qui a le meilleur comportement en courant d'obscurité) nous avons mesuré des courants d'obscurité de 5 à 6 décades supérieurs à l'état de l'art HgCdTe. Sur cette même structure, nos mesures de rendement quantique ont mis en évidence une difficulté au niveau de la collection des porteurs, que nous avons attribuée à une faible longueur de diffusion des trous. Cela peut là aussi être relié au faible temps de vie puisque : $L_{\text{diff}} = \sqrt{\mu \frac{kT}{q} \tau_{\text{vie}}}$ (où μ est la mobilité, k la constante de Boltzmann, q la charge de l'électron, T la température et τ_{vie} le temps de vie). Il semble donc que le temps de vie des porteurs minoritaires soit le paramètre qui limite les performances globales des composants que nous avons testés.

- **les niveaux de bruit** : on retrouve bien sur tous les monoéléments testés un plateau de bruit propre limité par la contribution Schottky théorique. Le bruit en $1/f$, plus ou moins présent selon les composants, n'est jamais prépondérant pour les tensions de polarisation typiques des circuits de lecture actuels.
- **l'allure de la réponse angulaire** : nous avons mesuré une réponse angulaire relativement plate sur des monoéléments MWIR, ce qui n'est pas surprenant compte tenu du fait qu'il n'y a pas de structure de couplage sur les pixels super-réseau.

Le [Tableau 5.1](#) récapitule les principaux résultats obtenus. Notons qu'à ce jour, nous n'avons pas pu étudier l'uniformité spatiale de la filière française (bruit spatial fixe, bruit spatial fixe résiduel, et surtout stabilité dans le temps des corrections). Ce sera chose faite dans un futur très proche, puisque deux nouvelles matrices sont en cours de réalisation dans le cadre du PEA Vitrail. Nous avons en revanche eu l'occasion de réaliser une première estimation de l'uniformité d'un composant commercial IR-Nova, et il s'est avéré que cette matrice présente moins de 10 pixels clignotants et une très bonne stabilité dans le temps des corrections (le bruit spatial fixe résiduel (BSFR) est inchangé après plus de 5 mises en froid). Ces résultats restent à confirmer par une caractérisation plus complète.

Rappelons que l'intérêt de la filière super-réseau pour le domaine spectral MWIR était conditionné au fait qu'elle puisse adresser la problématique HOT en proposant des températures de fonctionnement plus élevées que les filières concurrentes. A ce jour, nous avons estimé une température BLIP de 110K sur le meilleur détecteur réalisé par l'IES (avec une longueur d'onde de coupure de

Paramètre	Points positifs	Points négatifs
Courant d'obscurité	une gravure soignée et une protection des surfaces permettent de supprimer les courants de fuite surfaciques	malgré ça, le courant d'obscurité à 77K reste 500 fois supérieur à l'état de l'art des détecteurs à super-réseau, et 5-6 décades au-dessus de l'état de l'art HgCdTe (Ruleo7)
Rendement quantique	<ul style="list-style-type: none"> — pour la structure InAs-rich, environ 40% en monoélément et en matrice (rendement quantique moyen entre 3 et 5μm) — valeurs à l'état de l'art super-réseau 	<ul style="list-style-type: none"> — rendement quantique limité par le faible temps de vie — valeurs un facteur 2 en-dessous de l'état de l'art HgCdTe
Temps de vie		<ul style="list-style-type: none"> — typiquement 30ns, contre 40ns à 80ns reportés pour des super-réseaux MWIR dans la littérature — impacte le courant d'obscurité et le rendement quantique
Réponse angulaire	assez plate (confirme ce qui était attendu)	
Bruit temporel	limité par la contribution Schottky pour des tensions de polarisation typiques des circuits de lecture actuels	
Bruit spatial		

TABLE 4.1 – Synthèse des performances mesurées sur les détecteurs à super-réseau InAs/GaSb MWIR réalisés par l'IES, et comparaison avec l'état de l'art super-réseau [Chen *et al.*, 2015] et HgCdTe [Tennant, 2010].

5 μ m @ 77K, voir paragraphe 4.2.4). Nous avons identifié que cette température BLIP était limitée par le courant d'obscurité de ce détecteur, qui pourrait clairement être amélioré (il était typiquement 10 fois supérieur à l'état de l'art IES). Nos résultats sont néanmoins cohérents avec les températures BLIP reportées dans la littérature, qui atteignent 165K [Chen *et al.*, 2015] pour une longueur d'onde de coupure de 4.9 μ m @ 150K. A noter que les températures BLIP sont toujours estimées sur des monoéléments. Quand on passe au format matriciel, la température de fonctionnement maximum acceptable est généralement plus basse que la température BLIP : d'une part, de façon à contrer le bruit spatial fixe et les pixels morts, et, d'autre part, car l'angle de vue de la matrice avec

son écran froid est bien inférieur aux $2\pi sr$ supposés dans la définition de la température BLIP. Typiquement, dans la publication de référence [Chen *et al.*, 2015], la température de fonctionnement optimale de la matrice est de 120K, pour une température BLIP de 165K. Le fabricant suédois IR-Nova annonce également que sa matrice 640×512 pixels au pas de $15\mu\text{m}$ peut fonctionner de 80K à 120K (longueur d'onde de coupure de $5\mu\text{m}$ à 80K).

Intéressons-nous maintenant aux récentes évolutions des filières concurrentes. En ce qui concerne les filières bien établies, on peut ainsi noter :

- **filière InSb** : le fabricant SCD affiche qu'une température de fonctionnement de 95-100K est désormais accessible [Karni *et al.*, 2014], au lieu de 77K auparavant, grâce à un changement de technique de croissance du matériau (épitaxie par jets moléculaires). L'avantage de la filière InSb est toujours son uniformité et la grande stabilité dans le temps des corrections.
- **filière HgCdTe** : Sofradir propose à son catalogue un composant de type p/n de format 640×512 pixels au pas de $15\mu\text{m}$ fonctionnant à 140-150K pour une longueur d'onde de coupure de $4.2\mu\text{m}$ (composant « Galatea MWIR »). Sofradir a également présenté à la conférence DSS 2015 un prototype "p/n red" de 640×512 pixels au pas de $15\mu\text{m}$, fonctionnant à 130K avec une longueur d'onde de coupure de $5.2\mu\text{m}$. Le fabricant anglais Selex propose quant à lui le composant Hawk HOT MWIR, avec des performances globalement équivalentes.

En ce qui concerne les filières émergentes :

- **filière InAsSb** : le fabricant SCD propose à son catalogue plusieurs matrices InAsSb, notamment le composant HOT Hercules, au format 1280×1024 au pas de $15\mu\text{m}$ avec une température de fonctionnement de 150K pour une longueur d'onde de coupure de $4.2\mu\text{m}$. Cela correspond à ce que propose Sofradir en HgCdTe et à ce que reporte le CQD en super-réseau [Pour *et al.*, 2011]. SCD annonce que l'augmentation de la longueur d'onde de coupure de l'InAsSb au-delà de $4.2\mu\text{m}$ est à l'étude .
- au sein même de la **filière super-réseaux, une variante "gallium-free"** a émergé ces dernières années. Elle repose sur un empilement InAs/InAsSb, c'est-à-dire sans gallium, celui-ci étant soupçonné d'introduire des défauts responsables des limitations en performances observées sur des détecteurs super-réseaux InAs/GaSb. Les avis sont très contrastés sur le sujet : on note un engouement pour cette alternative du côté du CQD, qui a notamment reporté des monoéléments VLWIR avec de très bonnes performances électro-optiques [Hoang *et al.*, 2014]. L'industriel SCD prédit pour sa part que le rendement quantique des super-réseaux LWIR "gallium-free" restera inférieur à celui des détecteurs super-réseaux LWIR InAs/GaSb [Klipstein, 2015].

Le [Tableau 4.2](#) et le [Tableau 4.3](#) présentent une synthèse de cette analyse, avec les performances des composants mentionnés ci-dessus. On voit émerger deux « points de fonctionnement » communs à plusieurs filières : 150K pour une longueur d'onde de coupure de 4.2 μ m (obtenu pour HgCdTe, InAsSb et super-réseau) et 120-130K pour une longueur d'onde de coupure de 5 μ m (obtenu pour super-réseau et HgCdTe). Au niveau de la température de fonctionnement, la filière émergente super-réseau est donc au coude à coude avec ses principales rivales. Par contre, il est clair qu'elle n'a pas la même maturité technologique, ce qui devrait se ressentir sur l'opérabilité, même si cela n'apparaît pas clairement dans les tableaux de synthèse. Mais il est probable que les différents technologues n'utilisent pas le même critère pour définir cette opérabilité, ce qui rend la comparaison délicate. De la même façon, les valeurs de NETD reportées ne sont pas facilement comparables : il faut en toute rigueur connaître le temps d'intégration, qui n'est que rarement mentionné (la cadence image ne donne qu'un majorant). On peut néanmoins considérer que ces composants ont tous de très bonnes performances.

Société	IRNova	Sofradir	SCD
Référence	IRnova640-MW-R	[Reibel <i>et al.</i> , 2015]	Hercules
Filière	Super-réseau InAs/GaSb	HgCdTe p/n	InSb
Format	640 \times 512	640 \times 512	1280 \times 1024
Pas pixel	15 μ m	15 μ m	15 μ m
Température de fonctionnement T_{det}	80-120K	130K	80K
Longueur de coupure à T_{det}	5 μ m	5.2 μ m	5.4 μ m
Ecran froid	f/4	f/4	f/5.3
NETD	20mK @60Hz	20mK	22mK (50% well fill)
Opérabilité	> 99.75%	-	> 99.5%

TABLE 4.2 – Synthèse des composants reportés avec une longueur d'onde de coupure voisine de 5 μ m à leur température de fonctionnement.

En conclusion, les actions menées en France depuis 2007 sur les détecteurs à super-réseau de type II InAs/GaSb n'ont pas révélé de point bloquant pour cette filière. Les performances électro-optiques mesurées correspondent globalement à ce qui était attendu. Il est vrai qu'elles ne sont pas supérieures à celles des filières bien établies (notamment HgCdTe), mais il faut mettre ce résultat en perspective par rapport aux moyens financiers et humains qui ont été mis en place. L'uniformité spatiale et de la stabilité des corrections sont en cours d'évaluation à l'ONERA, mais les premiers résultats laissent espérer un comportement très satisfaisant.

Société / Labo	CQD	Sofradir	SCD
Référence	[Pour <i>et al.</i> , 2011]	[Rubaldo <i>et al.</i> , 2016]	HOT Hercules
Filière	Super-réseau InAs/GaSb	HgCdTe p/n	InAsSb (XBn)
Format	320 × 256	640 × 512	1280 × 1024
Pas pixel	30μm	15μm	15μm
Température de fonctionnement T_{det}	150K	140-150K	150K
Longueur de coupure à T_{det}	4.2μm	4.2μm	4.2μm
Ecran froid	f/2.3	f/4	f/5.5
NETD	11mK @ 120K 150mK @ 150K	< 20mK (293K, 50% well fill, 60Hz)	20mK (50% well fill)
Opérabilité	-	> 99.9%	> 99.96%

TABLE 4.3 – Synthèse des composants reportés avec une longueur d'onde de coupure voisine de 4.2μm à leur température de fonctionnement.

Cependant, pour décider s'il faut ou non passer à la vitesse supérieure concernant la filière super-réseaux, il faut regarder au-delà des considérations purement techniques et prendre en compte le contexte industriel et financier. Or, à ce jour en France :

- la filière "reine" reste la filière HgCdTe, pour laquelle de nombreuses actions sont encore financées, avec notamment de très bons résultats en HOT.
- Sofradir a aussi mis récemment à son catalogue la filière InSb, suite au rachat de cette activité à Sagem. L'optimisation des performances de cette filière est source d'un gros travail de recherche et développement, au CEA/-LETI et à Sofradir.
- enfin, la DGA finance une action pour évaluer le potentiel de la filière émergente InAsSb en MWIR.

Face à tant de concurrents dans le MWIR, et compte tenu du fait qu'il est extrêmement coûteux de développer et de maintenir une filière, il semble peu propice d'encourager un transfert industriel vers Sofradir des super-réseaux dans le MWIR.

En revanche, l'analyse est complètement différente dans le LWIR. En effet, il n'existe aujourd'hui pas de filière couvrant avec de bonnes performances la totalité de cette bande spectrale (voir paragraphe suivant).

4.4 PROJET

L'année 2015 a constitué une période charnière dans notre démarche. En effet, nous avons pu émettre un premier avis d'expert sur le potentiel de la filière super-réseau pour le domaine spectral MWIR. Comme mentionné au paragraphe précédent, cet avis doit être consolidé par une étude minutieuse du bruit spatial sur des matrices réalisées par le consortium français. Celle-ci est prévue à très court terme, puisque la réalisation de deux matrices à super-réseau MWIR est en cours dans le cadre du PEA Vitrail, avec une zone active dimensionnée selon les recommandations d'Edouard Giard : $2\mu\text{m}$ d'épaisseur, structure InAs-rich légèrement dopée p. La croissance, la gravure et la passivation ont été réalisées, et les matrices ont été hybridées. Il reste donc à retirer le substrat, ce qui constitue aujourd'hui une difficulté technologique pour notre consortium. Plusieurs pistes sont à l'étude, notamment une attaque purement chimique (collaboration CNRS/LPN - université de Versailles). Dans le cas particulier des deux matrices mentionnées ci-dessus, c'est la société IR-Nova qui réalisera ce retrait du substrat. Nous devrions donc être en mesure de réaliser des mesures d'uniformité sur des matrices à super-réseau MWIR au début de l'année 2016.

L'année 2015 a également été marquée par plusieurs changements d'orientation décisifs. Le premier est un changement de domaine spectral. Nous pensons en effet qu'il est indispensable d'adresser le domaine LWIR-VLWIR (longueurs d'ondes supérieures à $8\mu\text{m}$), car c'est le deuxième grand domaine spectral pour lequel la filière super-réseaux pourrait avoir un intérêt. En effet, actuellement le bas de la bande LWIR ($8 - 9.5\mu\text{m}$) est couvert avec de bonnes performances par la filière HgCdTe. En revanche, l'augmentation de la longueur d'onde de coupure dans HgCdTe s'accompagne d'une diminution des performances (uniformité, stabilité dans le temps des corrections, pixels clignotants...) liée à des difficultés matériaux. Avoir une filière permettant de couvrir la totalité de la bande $8 - 12\mu\text{m}$ avec de bonnes performances et de grands formats (au moins 1000×1000 pixels) serait donc très intéressant. Sans compter qu'il existe également des besoins en VLWIR, aussi bien pour des applications militaires (défense anti-missiles balistiques) que pour des applications civiles (météo vers $14\mu\text{m}$, ou encore sondage atmosphérique vers $16\mu\text{m}$). Pour adresser ce nouveau domaine spectral LWIR/VLWIR, la thèse de Rémi Rossignol a démarré à l'IES fin 2014 (bourse IES ; Directeur de thèse : Philippe Christol). L'objectif est de réaliser des détecteurs super-réseaux LWIR. En parallèle, nous avons lancé à l'ONERA celle de Jean Nghiem-Xuan en octobre 2015 (bourse 50% DGA et 50% Labex FOCUS ; directeur de thèse : R. Haïdar ; co-directeurs de thèse : Philippe Christol et moi-même). L'objectif est la caractérisation fine de ces détecteurs et l'orientation de la filière super-réseaux LWIR : on retrouve donc le même schéma de fonctionnement que celui qui a déjà fait ses preuves dans le MWIR.

Pour le domaine LWIR, il est clair que la passivation est un point plus critique : d'une part, les courants surfaciques augmentent dramatiquement avec la

longueur d'onde de coupure, une passivation efficace est donc encore plus indispensable qu'en MWIR ; d'autre part, il y a très peu de « recettes » reportées dans la littérature. L'utilisation de structures à bandes bloquantes semble également indispensable, compte tenu des petits gaps mis en jeu. Ce sera là un des points clés de la thèse de Rémi Rossignol. De son côté Jean Nghiem-Xuan devra adapter les bancs de test existants à ce nouveau domaine spectral (notamment le banc de mesure de temps de vie des porteurs minoritaires). L'action de modélisation fine des performances des détecteurs à super-réseau, initiée dans le cadre de la thèse de Julien Imbert, devra également être poursuivie, notamment en incluant les phénomènes de transport électronique. En parallèle de ces actions purement académiques, nous essayons également d'avoir un soutien financier de la DGA pour la filière super-réseau. Nous proposerons à la DGA, à la suite du PEA Vi-trail, un projet avec une action entièrement dédiée à la filière super-réseau, avec toujours pour objectif d'évaluer l'apport d'architectures de type plasmonique. Nous pensons en effet que ce type d'architecture peut apporter une véritable rupture technologique. Parmi les pistes investiguées, on peut citer la réduction du volume de détection par confinement du champ électromagnétique (dans le but d'augmenter la température de fonctionnement par exemple), ou encore la « colorisation » des pixels (dans le but d'analyser le contenu spectral du rayonnement incident).

Pour étayer notre avis d'expert sur la filière super-réseau, il est particulièrement intéressant d'avoir accès à différents « fournisseurs » de détecteurs super-réseau. C'est ce que j'ai initié en 2015, en mettant en place une première collaboration avec l'industriel suédois IR-Nova, et une seconde collaboration avec l'université du Nouveau-Mexique. Nous avons déjà reçu une première matrice IR-Nova, d'un format de 320×256 pixels au pas de $30\mu\text{m}$. Celle-ci est intégrée dans un cryostat opérationnel avec machine à froid, et nous a été fournie avec son électronique de proximité. La caractérisation des performances électro-optiques de cette matrice est en cours à l'ONERA. Cela nous donnera une bonne idée de la maturité technologique des produits commerciaux à base de super-réseau, et plus particulièrement d'estimer l'uniformité spatiale et la stabilité dans le temps des corrections. En parallèle de cela, l'université du Nouveau-Mexique nous a envoyé des photodiodes à barrières bloquantes (domaine spectral MWIR). Leur caractérisation nous permettra d'avoir un avis critique sur les publications américaines, et d'orienter le design des structures réalisées par Rémi Rossignol à l'IES. Enfin, nos mesures de temps de vie nous ont permis d'initier une collaboration avec l'Air Force Research Laboratory (AFRL) aux Etats-Unis, qui réalise également de telles mesures, notamment sur des échantillons venant de l'université du Nouveau Mexique.

Il nous paraît également primordial de nous forger un avis d'expert sur la filière InAsSb dans le domaine MWIR. Côté ONERA, nous allons mener des actions de caractérisations sur des composants commerciaux. En parallèle, l'IES est associée à une autre action, exclusivement française cette fois-ci. Une thèse

a d'ailleurs été lancée à l'IES sur cette nouvelle filière fin 2014.

D'une manière plus générale, l'analyse des besoins opérationnels nous a permis de dégager des tendances souhaitables pour l'évolution des performances des détecteurs infrarouge, toutes filières confondues :

- **l'évolution vers des matrices de grands formats.** Pour des applications nécessitant à la fois un grand champ et une bonne résolution, comme par exemple la veille, il est nécessaire de disposer de matrices de grands formats (1000x1000 pixels ou 2000x2000 pixels) voire même très grands formats (4000x4000 ou 8000x8000 pixels). Aujourd'hui, des matrices méga-pixel (1000x1000 pixels) sont disponibles commercialement. Etant donné que ces 25 dernières années, l'évolution des formats des matrices infrarouge suit une loi de Moore avec un doublement du format tous les 18 mois, on peut espérer avoir d'ici 8-10 ans des matrices de 10 millions de pixels. Les verrous technologiques à lever d'ici là sont : 1/ la taille des substrats, pour obtenir de bons rendements technologiques ; 2/ le stitching sur circuit de détection et sur circuit de lecture ; 3/ l'hybridation ; éventuellement l'aboutage. Une des principales difficultés liées à la caractérisation d'aussi grands plans focaux sera l'uniformité de l'éclairage sur un grand champ.
- **l'évolution vers de petits pixels (typiquement 5µm).** Il existe actuellement une réflexion en France sur le sujet, dont l'objectif est de déterminer quel gain peut être attendu au niveau des performances et/ou au niveau de la compacité, en utilisant des matrices de "haute densité" (contenant beaucoup de petits pixels). D'un point de vue technologique, les principales difficultés seront probablement liées à la gravure et au maintien du rendement quantique. Au niveau de la caractérisation de ces composants avec de petits pixels, on peut d'ores et déjà prédire des différences expérimentales liées à la mesure de FTM (le sujet est en cours d'étude à l'ONERA) et aux faibles flux mis en jeu (qui rendront la chaîne de mesure plus complexe).
- **l'augmentation des températures de fonctionnement (HOT pour "high operating temperature"),** qui répond à des besoins opérationnels clairs : temps de mise en froid, ou plus généralement temps de mise en œuvre avant emploi (incluant les corrections), durée de vie de la machine à froid... A nouveau, cette évolution nécessite de résoudre des problèmes technologiques. D'un point de vue de la caractérisation électro-optique, il faudra adresser la question de la robustesse. En effet, la matrice fonctionnera dans un mode que l'on peut qualifier de "dégradé" par rapport à la température de fonctionnement nominale, il faudra donc estimer si les performances mesurées sont reproductibles dans le temps et robustes par rapport à une petite fluctuation de température de fonctionnement.
- **l'optimisation des circuits de lecture.** Ces dernières années, les efforts ont porté sur : l'introduction d'une numérisation dans le plan focal, l'évolu-

tion vers les faibles flux, l'ajout de fonctionnalités (comme par exemple le double échantillonnage corrélé). On peut imaginer aller jusqu'à introduire des fonctions de traitement du signal ou de traitement d'image directement dans le circuit de lecture (du type extraction de contours par exemple). Il faudra alors développer de nouvelles électroniques de proximité pour s'adapter à ces nouvelles fonctionnalités. Du point de vue de la caractérisation, il est possible que les figures de mérite actuelles soient remises en cause (notamment s'il existe un traitement non linéaire de l'information).

- **l'utilisation de nano-structurations**, afin de fonctionnaliser optiquement le circuit de détection. Notamment, cela pourrait permettre de diminuer le volume de détection ou de réaliser une analyse spectrale au niveau même de la matrice de détecteurs. Là encore, il faudra réfléchir à ce qu'il est pertinent de mesurer lors des caractérisations électro-optiques : il faudra peut-être définir de nouvelles figures de mérite.

Il est clair que tous ces sujets peuvent faire apparaître de nouveaux besoins en matière de caractérisation électro-optique. Etant associés en tant qu'experts aux différents développements en cours chez les technologues, nous espérons pouvoir anticiper ces besoins de façon à pouvoir statuer, le temps venu, sur la pertinence de ces alternatives technologiques.

ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Sommaire

5.1	Interventions dans les écoles et les lycées	63
5.2	Enseignement à Polytech Paris Sud	63
5.3	Enseignement à l'IOGS	63
5.4	Enseignement dans le cadre du Labex FOCUS	64

Après quelques années de recherche et d'expertise dans le domaine de la détection, j'ai éprouvé l'envie de partager et de transmettre mes connaissances au travers d'actions d'enseignement. J'ai commencé par des interventions de style « vulgarisation scientifique » sur l'infrarouge, face à un public varié et parfois très jeune (voir paragraphe 5.1). J'ai ensuite commencé à enseigner dans deux écoles d'ingénieurs : Polytech Paris Sud de 2010 à 2013 (voir paragraphe 5.2) et l'IOGS (Institut d'Optique Graduate School) à partir de 2011 (voir paragraphe 5.3). J'ai enfin eu l'occasion d'organiser et de participer aux enseignements d'un stage récurrent sur la détection dans le cadre du Labex FOCUS (FOCal plane arrays for Universe Sensing) à partir de 2013 (voir paragraphe 5.4). Le tableau [Tableau 5.1](#) résume l'ensemble des heures d'enseignement réalisées.

Année scolaire 2010-2011	<ul style="list-style-type: none"> — 6h de cours sur l'infrarouge à Polytech Paris Sud — 6h de cours sur l'infrarouge en lycée (classes prépa BCPST et seconde) — encadrement d'un TIPE en classe prépa BCPST sur la couleur des ailes des papillons ☞ Total : 12h
Année scolaire 2011-2012	<ul style="list-style-type: none"> — 81h de TP d'optique en formation initiale à l'IOGS — 36h de cours/TD/TP d'optique en formation continue à l'IOGS — 12h de cours sur l'infrarouge à Polytech Paris sud, et mise au point d'un TP "caméra infrarouge" ☞ Total : 129h
Année scolaire 2012-2013	<ul style="list-style-type: none"> — 112h de TP d'optique en formation initiale à l'IOGS — 20h de cours/TD/TP d'optique en formation continue à l'IOGS — 10h de cours sur l'infrarouge à Polytech Paris sud — 2h de cours sur l'infrarouge en classe prépa BCPST ☞ Total : 144h
Année scolaire 2013-2014	<ul style="list-style-type: none"> — 77h de TP d'optique en formation initiale à l'IOGS — 57h de cours/TP d'optique en formation continue à l'IOGS — 4h de cours sur l'infrarouge en classe prépa BCPST — 4h de TP sur l'imagerie infrarouge au stage « détection » du Labex FOCUS ☞ Total : 142h
Année scolaire 2014-2015	<ul style="list-style-type: none"> — 77h de TP d'optique en formation initiale à l'IOGS — 59h de cours/TP d'optique en formation continue à l'IOGS — 8h de cours/TP sur l'imagerie infrarouge au stage « détection » du Labex FOCUS ☞ Total : 144h
Année scolaire 2015-2016 (prévisions)	<ul style="list-style-type: none"> — 77h de TP d'optique en formation initiale à l'IOGS — 59h de cours/TP d'optique en formation continue à l'IOGS — 2h de cours de radiométrie pour le master ELS (Embedded Lighting Systems) de l'IOGS — 4h de cours sur l'infrarouge en classe prépa BCPST — 10h de cours/TP sur les détecteurs infrarouge au stage « détection » du Labex FOCUS ☞ Total : 152h

TABLE 5.1 – Heures d'enseignement dispensées depuis 2010.

5.1 INTERVENTIONS DANS LES ÉCOLES ET LES LYCÉES

Depuis 2008, je réalise des interventions de vulgarisation scientifique sur le thème de l'optique et de l'infrarouge. A une époque où les filières scientifiques sont délaissées par les étudiants, ces interventions sont pour moi l'occasion de faire connaître le métier de chercheur. L'optique est une discipline qui permet de réaliser des expériences spectaculaires, provoquant l'émerveillement des plus jeunes. Nous avons ainsi, avec deux institutrices de l'école maternelle Joliot-Curie de Palaiseau, organisé une série d'interventions sur le thème du mélange des couleurs et de l'infrarouge. Dix classes étaient concernées (soit environ 300 élèves), de la petite section de maternelle jusqu'au CM2. Ce projet a été récompensé par le prix Ile de Science 2009.

Je réalise également tous les ans une intervention sur l'infrarouge au lycée Jean-Baptiste Say à Paris. Cette intervention est destinée aux élèves de classes préparatoires BCPST, spécialisés en biologie. Suite à une de ces interventions, j'ai également encadré un TIPE (Travail d'Initiative Personnelle et Encadré) sur l'origine physique de la couleur des ailes des papillons Morpho.

Je participe enfin régulièrement aux actions menées par l'ONERA dans le cadre de la fête de la science.

5.2 ENSEIGNEMENT À POLYTECH PARIS SUD

A partir de 2010, j'ai eu l'occasion d'étendre mon champ d'action au niveau post-bac, puisque l'école d'ingénieurs Polytech Paris-Sud m'a confié 6h de cours sur l'infrarouge. L'année suivante, je leur ai proposé de mettre en place un module dédié à l'infrarouge et aux systèmes optroniques. Ce module, programmé en dernière année (bac+5) pour les élèves ayant choisi l'option « optronique », contient 10 à 12h de cours/TD, ainsi qu'un TP de 8h que j'ai entièrement mis au point. L'objectif de ce TP est de prendre en main une caméra infrarouge, de mesurer ses performances et de l'utiliser pour des applications de contrôle non destructif. Ce TP tourne tous les ans depuis 2012.

En plus des heures d'enseignement décrites ci-dessus, j'ai eu l'occasion d'encadrer des élèves sur des mini-projets et de mettre en place des examens sur le module « infrarouge ». J'ai également pris en stage l'une de mes étudiantes, Bich-Lien Nghiem (qui a travaillé au développement du banc de mesures de bruit décrit au paragraphe 3.1.4).

Ces deux dernières années scolaires, c'est mon doctorant Edouard Giard qui a assuré les heures de cours et de TD à Polytech Paris Sud.

5.3 ENSEIGNEMENT À L'IOGS

Depuis la rentrée 2011, j'enseigne également à l'IOGS (Institut d'Optique Graduate School), aussi bien dans le cursus initial (élèves ingénieurs intégrant l'école sur concours) qu'en formation continue (stages de 3 à 6 jours proposés à des personnes déjà en activité).

Dans le cursus initial, j'ai donné la première année 80h de TP d'optique instrumentale en première année (bac+3). Depuis 2012, je donne entre 80h et 110h de TP d'optique en deuxième année (bac+4), sur les sujets suivants : optique instrumentale, radiométrie, détection, infrarouge, télémétrie laser. Les séances de TP durent 4h30. Je participe également à l'évaluation des élèves lors des examens programmés chaque année en mai.

Au niveau de la formation continue, mon implication a été progressive : les deux premières années, j'ai donné des cours sur les détecteurs infrarouge et des TD/TP sur l'optique instrumentale, à hauteur d'une trentaine d'heures par an. A partir de l'année 2013, ce volume a considérablement augmenté suite au départ à la retraite de Jean-Louis Meyzonnette (professeur à l'IOGS jusqu'en 2013). J'ai ainsi été chargée de reprendre la responsabilité de quatre stages liés à la radiométrie, à l'infrarouge, aux systèmes optroniques et aux caméras infrarouge. Cela consiste à trouver des intervenants pour chaque créneau de cours, à veiller à la bonne cohérence des enseignements dispensés dans le stage, et à faire évoluer le contenu du stage si le besoin s'en fait sentir. J'ai ainsi repris à ma charge l'essentiel des heures faites jusque-là par Jean-Louis Meyzonnette, mais j'ai aussi fait appel à de nouveaux enseignants pour quelques créneaux (notamment les cours sur les systèmes laser ou certains cours sur l'atmosphère). Au final, j'effectue depuis l'année 2013-2015 environ 60h de cours par an en formation continue, sur les sujets suivants : radiométrie, sources, atmosphère, optique, détecteurs (visibles et infrarouge), conception et validation de systèmes optroniques. Je dispense la plupart de ces heures à l'IOGS même, dans le cadre de stages appelés « inter-entreprises », c'est-à-dire avec des stagiaires venant de sociétés différentes et avec des préoccupations quotidiennes très variées. Certaines sociétés demandent au contraire des stages « intra-entreprises ». Dans ce cas, un seul enseignant se déplace pour réaliser le stage, avec un programme sur mesure, adapté aux besoins spécifiques de l'entreprise en question. A ce jour, j'ai été sollicitée par deux industriels français pour réaliser des stages « intra » sur le thème des systèmes optroniques. J'ai réalisé le premier stage trois fois (2013, 2014 et 2015), et le second une seule fois (2015). Il s'agit de stages de 3 jours dans les deux cas, mais le programme est différent.

Mon statut a évolué au cours de ces années d'enseignement à l'IOGS : j'ai d'abord été vacataire de 2011 à 2013, puis en CDD de 2013 à 2014, pour finalement être nommée PAST (personnel associé à statut temporaire) en juillet 2014 pour 3 ans. Afin de donner dans de bonnes conditions mes 150h de cours par an à l'IOGS, j'ai fait le choix de me mettre à temps partiel à 70% de temps travaillé à l'ONERA (depuis 2013).

5.4 ENSEIGNEMENT DANS LE CADRE DU LABEX FOCUS

Le Labex FOCUS (FOCal plane arrays for Universe Sensing) vise le développement de détecteurs pour l'observation astronomique (2010-2020). Coordonné par Pierre Kern de l'IPAG, ce Labex est hébergé par le PRES Université de Grenoble et drainé par le réseau industriel (SOFRADIR, ULIS, ST-Micro, E2V, plateforme Minatoc-LETI...) et académique (IPAG, Institut Néel...) local, auquel

quelques autres laboratoires ont également été associés (ONERA/DOTA, CEA-Irfu-Sap, LAM...).

Le Labex FOCUS comporte trois axes de recherche : infrarouge, millimétrique/sub-millimétrique et systèmes de détection avancés. Il a également un axe d'enseignement, que je coordonne avec Gilles Duvert (IPAG). Dans le cadre de ces actions liées à l'enseignement, nous avons notamment mis en place un stage d'une semaine dédié à la détection, qui s'adresse à un public d'élèves de master 2 ou d'écoles d'ingénieur, ou encore à des doctorants. Ce stage a lieu à l'Observatoire de Haute Provence. Le principe est le suivant : les matinées sont consacrées à des cours (notamment sur l'instrumentation pour l'astronomie, les détecteurs, le bruit et le traitement d'images) ; les après-midi sont consacrés à des séances de travaux pratiques ou de démonstration, lors desquelles les étudiants peuvent notamment caractériser des matrices de détecteurs CCD ; les soirées sont consacrées à l'observation du ciel, les élèves ayant ainsi l'occasion de mettre en œuvre au foyer des télescopes les détecteurs caractérisés dans l'après-midi.

Mon rôle a été d'organiser ce stage avec l'IPAG (Gilles Duvert et Pierre Kern) et le CEA-Irfu-Sap (Pascal Gallais). Nous avons défini le programme pédagogique, trouvé des enseignants pour les cours et les TP, lancé un appel d'offre de façon à financer une bonne partie des manips de TP, fait la publicité de ce stage et organisé la procédure de sélection des candidats. Ce stage a déjà eu lieu 3 fois : en novembre 2013 pour des élèves en master 2 et des doctorants, en octobre 2014 pour des élèves de master 2, et en mai 2015 pour des doctorants. J'ai contribué aux enseignements des deux premières sessions : cours d'optique et de radiométrie (en 2013 et 2014), cours sur les détecteurs (en 2014), démo sur l'imagerie infrarouge (en 2013 et 2014, voir [Figure 5.1](#)) et démo sur la mesure de FTM détecteurs (en 2013).

Face au succès de ce stage, nous avons décidé de le reconduire une à deux fois par an, toujours pour un public d'élèves de master et de doctorants. Nous envisageons également de le proposer comme stage de formation continue pour le CNRS.

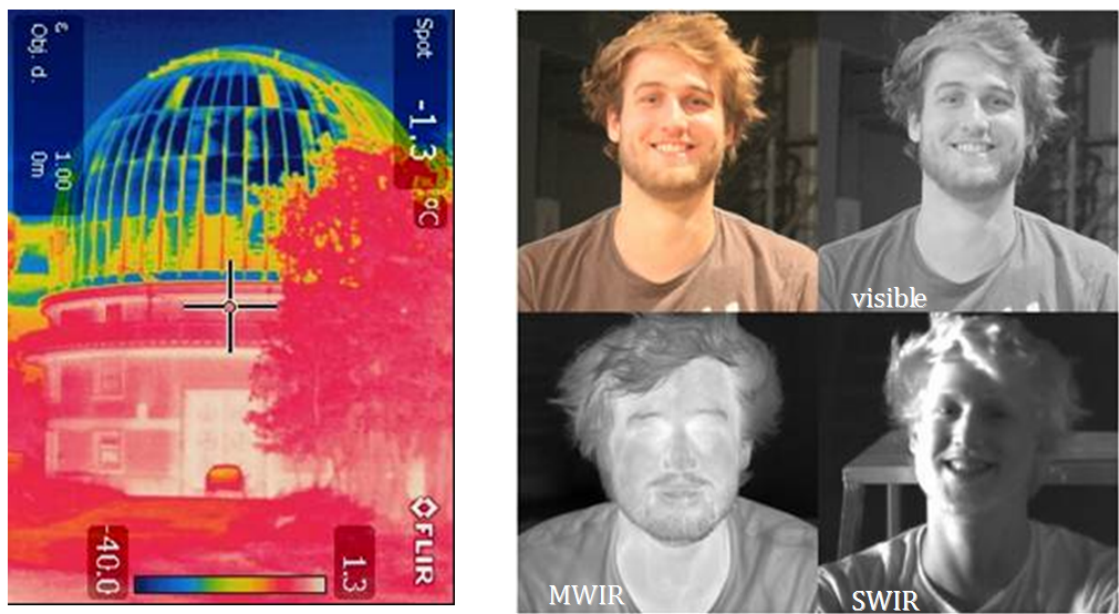


FIGURE 5.1 – Démo sur l'imagerie infrarouge réalisée à l'Observatoire de Haute Provence.

CONCLUSION

A travers ce mémoire, j'ai retracé l'essentiel de mon travail de recherche consacré à l'orientation des filières émergentes en détection infrarouge.

J'ai notamment présenté les cinq bancs de test que j'ai contribué à développer, à travers différents travaux de thèse et de post-doc. Le banc de réponse spectrale hors bande, le banc de réponse angulaire et les bancs de mesure sous flux sont désormais disponibles au laboratoire détecteurs de l'ONERA et sont utilisés de façon routinière pour les caractérisations électro-optiques de détecteurs infrarouge, qu'ils soient sous forme matricielle (filières bien établies) ou de monoéléments (filières émergentes). Le banc de mesure de bruit est lui aussi disponible et adaptable à tous types de mono-éléments. Quant au banc de mesure de temps de vie des porteurs minoritaires, il est pour l'instant limité à des filières fonctionnant en bande $3 - 5\mu\text{m}$, mais son adaptation à la bande $8 - 12\mu\text{m}$ est prévue à court terme.

J'ai également présenté trois outils de modélisation que j'ai contribué à développer. Les deux premiers ont permis de mieux comprendre la physique de la détection dans les détecteurs à multipuits quantiques, au niveau du couplage optique et du transport électronique, respectivement. Utilisés au départ comme outils d'analyse et d'interprétation de nos mesures, ils sont devenus des outils d'aide au design de structures optimisées, avec des performances électro-optiques améliorées. Le troisième outil de modélisation, qui a pour but de prédire les performances d'instruments infrarouge, existait bien avant mon arrivée dans l'équipe. Mon rôle s'est borné à inclure des filières émergentes dans les briques détecteurs proposées, et à utiliser cet outil pour évaluer le potentiel des différentes filières émergentes pour des applications données.

J'ai ensuite présenté l'exemple concret de la filière émergente super-réseaux, dont je pilote l'orientation à l'ONERA depuis dix ans. Ce thème de recherche m'a donné l'occasion de mettre en place une collaboration sur le long terme avec l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) de l'université de Montpellier. Au total, nous avons mis en place et encadré 7 thèses et deux post-docs sur les super-réseaux. Nous avons également mis en place un consortium français pour l'optimisation de la filière super-réseaux, incluant l'IES, le CEA/LETI, le LPN, le III-V Lab, la DGA et l'ONERA. J'ai également initié des collaborations avec plusieurs équipes internationales : IR-Nova en Suède, l'université du Nouveau-Mexique et l'AFRL aux Etats-Unis. Les résultats des travaux menés depuis 2005 m'ont permis de conclure dans ce manuscrit sur le potentiel de la filière super-réseaux dans le domaine spectral $3 - 5\mu\text{m}$. Rappelons que cet exercice est toujours complexe et risqué. En effet, il nécessite de comparer des filières de maturités technologiques très différentes, et donc d'extrapoler ce que

pourraient être les performances de la filière émergente à horizon de quelques années.

J'ai ensuite dégagé plusieurs axes de recherche pour les années à venir : les premiers sont directement liés à la filière super-réseaux, avec notamment une évolution du domaine spectral ; les suivants découlent d'une analyse des tendances souhaitables pour l'évolution des performances des détecteurs infrarouges : évolution vers les grands formats et/ou vers les petits pixels, augmentation des températures de fonctionnement, optimisation des circuits de lecture et utilisation de nano-structuration. Tous ces sujets de recherche peuvent faire apparaître de nouveaux besoins en matière de caractérisation électro-optique.

Pour finir, j'ai récapitulé l'ensemble des actions d'enseignement auxquelles j'ai été associée depuis 2010, elles aussi centrées sur la détection infrarouge, en particulier celles liées à mon poste de PAST à l'IOGS.

En parallèle de mon travail de recherche et d'enseignement, j'ai également assuré la responsabilité du laboratoire AIQUIDO de l'ONERA, de 2010 à 2014. Je suis aussi, depuis 2011, responsable du projet d'expertise détecteurs Mélusine (Mélusine 1 (2011-2014) puis Mélusine 2 (2015-2018)).

RÉFÉRENCES DE L'AUTEUR

Sommaire

7.1	Articles publiés dans des revues à comité de lecture . . .	69
7.2	Revue « grand public »	71
7.3	Communications à des conférences internationales	71
7.4	Rapports internes (non classifiés)	74
7.5	Thèses partiellement encadrées / dirigées	75
7.6	Post-doc encadré	76
7.7	Stages encadrés	76

7.1 ARTICLES PUBLIÉS DANS DES REVUES À COMITÉ DE LECTURE

- Guérineau, N., Rommeluère, S., Di Mambro, E., Ribet, I., Primot, J., Costard, E., (2003). New techniques of characterisation. *Comptes Rendus Physique*, 4(10):1175-1185.
- Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N., Suffis-Carretero, S., Tauvy, M., De Rossi, A., Costard, E., et Bois, P. (2005). Effect of oblique incidence on the spectral response of quantum well infrared photodetectors. *Journal of applied physics*, 97(2):023106.
- Ribet-Mohamed, I., Le Rouzo, J., Rommeluere, S., Tauvy, M. et Guérineau, N. (2005). Advanced characterization of the radiometric performances of quantum well infrared photodetectors. *Infrared physics & technology*, 47(1): 119-131.
- Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N., Haïdar, R., Tauvy, M., Rosencher, E. et Chuang, S. (2006). Van hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *Applied physics letters*, 88(9):091117.
- Boucher, Y.G., Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N., Haïdar, R. (2006). Description matricielle de l'anisotropie d'une transition intersous-bande dans une structure à multipuits quantiques. *J. Phys. IV France*, 135: 99-101.
- Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N., Haïdar, R., Tauvy, M., Rosencher, E. (2006). Singularités de Van Hove des transitions inter sous-bande dans les détecteurs infrarouge à multipuits quantiques (MPQ). *J. Phys. IV France*, 135 :215-217
- Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Haidar, R., Tauvy, M., Guérineau, N., Rosencher, E. et Chuang, S. (2007). Van hove singularities in intersubband

- transitions in multiquantum well photodetectors. *Infrared physics & technology*, 50(2):113–118.
8. Boucher, Y., Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I. et Haïdar, R. (2008). Modified form birefringence in periodic multilayer structures including uniaxial anisotropic materials. *JOSA B*, 25(5):777–784.
 9. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Berger, V. et Rosencher, E. (2009). Quantum transport in quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Infrared Physics & Technology*, 52(6):247–251.
 10. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Tauvy, M., Nedelcu, A., Berger, V. et Rosencher, E. (2009). Ultimate performance of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Infrared Physics & Technology*, 52(4):132–137.
 11. Lhuillier, E., Péré-Laperne, N., Ribet-Mohamed, I., Rosencher, E., Patriarche, G., Buffaz, A., Berger, V., Nedelcu, A. et Carras, M. (2010). Quantum well infrared photodetectors hardness to the nonideality of the energy band profile. *Journal of Applied Physics*, 107(12):123110.
 12. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Berger, V. et Rosencher, E. (2010). Quantum transport in weakly coupled superlattices at low temperature. *Physical Review B*, 81(15):155305.
 13. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Péré-Laperne, N., Tauvy, M., Deschamps, J., Nedelcu, A. et Rosencher, E. (2010). 15 μ m quantum well infrared photodetector for thermometric imagery in cryogenic windtunnel. *Infrared Physics & Technology*, 53(6):425–429.
 14. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Rosencher, E., Patriarche, G., Buffaz, A., Berger, V. et Carras, M. (2010). Interface roughness transport in terahertz quantum cascade detectors. *Applied Physics Letters*, 96(6):061111.
 15. Lhuillier, E., Rosencher, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Doyennette, L. et Berger, V. (2010). Quantum scattering engineering of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Journal of Applied Physics*, 108(11):113707.
 16. Jaworowicz, K., Ribet-Mohamed, I., Cervera, C., Rodriguez, J.-B. et Christol, P. (2011). Noise characterization of midwave infrared InAs/GaSb superlattice pin photodiode. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 23(4):242–244.
 17. Cervera, C., Christol, P., Chaghi, R., Aït-kaci, H., Rodriguez, J.-B., Jaworowicz, K. et Ribet-Mohamed, I. (2011). Temperature dependance performances of InAs/GaSb superlattice photodiode. *Infrared Physics and Technology*, 54(3):258–262.
 18. Lhuillier, E., Péré-Laperne, N., Rosencher, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Doyennette, L. et Berger, V. (2011). Dark current reduction in a long wavelength quantum well infrared photodetector operating at low temperature. *Infrared Physics & Technology*, 54(3):189–193.
 19. Cervera, C., Ribet-Mohamed, I., Taalat, R., Perez, J.-P., Christol, P. et Rodriguez, J.-B. (2012). Dark Ccurrent and noise measurements of an

InAs/GaSb superlattice photodiode operating in the midwave infrared domain. *Journal of Electronic Materials* ISSN 0361-523, 41(10)

20. Taalat, R., Rodriguez, J., Cervera, C., Ribet-Mohamed, I. et Christol, P. (2013). Electrical characterizations of asymmetric InAs/GaSb superlattice MWIR photodiodes. *Infrared Physics & Technology*, 59:32–35.
21. Giard, E., Ribet-Mohamed, I., Jaeck, J., Viale, T., Haïdar, R., Taalat, R., Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Steveler, E., Bardou, N. *et al.* (2014). Quantum efficiency investigations of type-II InAs/GaSb midwave infrared superlattice photodetectors. *Journal of Applied Physics*, 116(4):043101.
22. Giard, E., Taalat, R., Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Christol, P. et Ribet-Mohamed, I. (2014). Radiometric and noise characteristics of InAs-rich T2SL MWIR pin photodiodes. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 9.
23. Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Taalat, R., Konczewicz, L., Desrat, W., Contre-ras, S., Giard, E., Ribet-Mohamed, I. et Christol, P. (2015). Midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode with a dopant-free p-n junction. *Infrared Physics & Technology*, 70 :76-80.
24. Giard, E., Ribet-Mohamed, I., Delmas, M., Rodriguez, J. et Christol, P. (2015). Influence of the p-type doping on the radiometric performances of MWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes. *Infrared Physics & Technology*, 70 :103-106.

7.2 REVUES « GRAND PUBLIC »

1. Guérineau, N., Ribet-Mohamed, I., Haïdar, R., Tauvy, M. et Caes, M. (2005). Nouvelles techniques de caractérisation des détecteurs infrarouge. *Photoniques*, 18.
2. Trétout, B., Grisch, F., Packan, D., Ribet-Mohamed, I., Lefebvre, M. (2009). Laser spectroscopy for in situ diagnostics. *Aerospace Lab*, 1.
3. Druart, G., De la Barrière, F., Guérineau, N., Ribet, I., Lefebvre, M. (2015). La vision comme source d'inspiration. *Photoniques*, 75.

7.3 COMMUNICATIONS À DES CONFÉRENCES INTERNATIONALES

1. Mosca, M., Reverchon, J.-L., Grandjean, N., Omnès, F., Duboz, J.-Y. et Ribet, I. (2003). Solar blind (Al, Ga) N metal-semiconductor-metal devices for high performance flame detection. *MRS Proceedings*, 764, C4-4, Cambridge Univ Press .
2. Ribet-Mohamed, I., Le Rouzo, J., Rommeluere, S., Tauvy, M. et Guérineau, N. (2004). Advanced characterization of the radiometric performances of quantum well infrared photodetectors. *QWIP Workshop, Kananaskis, Canada*
3. Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N., Suffis-Carretero, S., Tauvy, M. et de Rossi, A., Costard, E. et Bois, P. (2004). Experimental study and modelisation of oblique incidence effect on QWIP's spectral response. *SPIE Defense*

- and Security Symposium 2004, Orlando, USA, Proceedings of SPIE 5406, Infrared Technology and applications XXX, 809-820*
4. Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N. , Haïdar, R., Tauvy, M. et Rosencher, E. (2005). Van Hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *COLOQ'9, Dijon, France*
 5. Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Haïdar, R., Guérineau, N. , Tauvy, M. , Rosencher, E. et Chuang, S. L. (2006). Van Hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *QWIP Workshop, Kandy, Sri Lanka*
 6. Le Rouzo, J., Ribet-Mohamed, I., Haïdar, R., Guérineau, N. , Tauvy, M. , Rosencher, E. et Chuang, S. L. (2006). Van Hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *International Conference on the Physics of semiconductors (ICPS), Vienne, Autriche*
 7. Bernhardt, S., Ribet-Mohamed, I., Haïdar, R., Maine, S., Guérineau, N. , Vincent, G. , Derelle, S. Druart, G. Rommeluere, S. Primot, J. et Deschamps, D (2008). Overview of alternative infrared detectors and focal plane arrays. *Astrophysics detectors workshop, Nice, France*
 8. Lhuillier, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Berger, V. et Rosencher, E. (2009). Quantum transport in quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *QSIP Workshop, Yosemite, California, USA*
 9. Ribet-Mohamed, I., Guérineau, N. , Tauvy, M., Caes, M. et Deschamps, J. (2009). Caractérisation de détecteurs infrarouge. *Optique Lille 2009 (28èmes Journées Nationales d'Optique Guidées et Horizons de l'Optique – Mini-colloque « Détecteurs infrarouge »)*
 10. Boucher, Y. et Ribet-Mohamed, I.(2009). Transmission tunnel assistée par défauts dans un détecteur infrarouge à multipuits quantiques. Poster. *Optique Lille 2009, Lille, France*
 11. Lhuillier, E., Rosencher, E., Ribet-Mohamed, I., Nedelcu, A., Doyonnette, L. et Berger, V. (2010). Dark current reduction in high wavelength quantum well infrared photodetector operating at low temperature. *QSIP Workshop, Istanbul, Turquie*
 12. Christol, P., Cervera, C., Perez, J.-P., Aït-Kaci, H., Rodriguez, J.-B., Konczewicz, L., Contreras, S., Jaworowicz, K., et Ribet-Mohamed, I. (2010). Electronic properties in InAs/GaSb Superlattice Detectors to Evaluate High Temperature Operation. Papier invité. *Photonics West 2010, San Francisco, USA, Proc. SPIE 7608, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII, 76081U*
 13. Christol, P., Cervera, C., Rodriguez, J.-B., Jaworowicz, K., et Ribet-Mohamed, I. (2011). Asymmetric InAs/GaSb superlattice pin photodiode to improve temperature operation. Papier invité. *Photonics West 2011, San Francisco, USA, Proc. SPIE 7945, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VIII, 79451H*
 14. Ribet-Mohamed, I. Jaworowicz, K., Tayibi, D., Cervera, C., Taalat, R., Rodriguez, J.-B., et Christol, P. (2011). Noise performance analysis of MWIR

- InAs/GaSb superlattice pin photodiodes. *SPIE Defense and Security 2011, Orlando, USA*, Proc. SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXX-VII, 80120Z
15. Taalat, R., Cervera, C., Christol, P., Rodriguez, J.-B. et Ribet-Mohamed, I. (2012). Analysis of electrical and photoelectrical characterizations of InAs/GaSb superlattice MWIR photodiodes. *QSIP Workshop, Carghese, France*
 16. Christol, P., Taalat, R., Maingue-Wilson, C., Cervera, C., Aït-Kaci, H., Rodriguez, J.-B. et Ribet-Mohamed, I. (2012). Optimization of InAs/GaSb superlattice pin photodiode design for the high temperature operation in the midwave infrared range. Papier invité. *SPIE Photonics West 2012, San Francisco, USA*, Proc. SPIE 8268, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX, 826833
 17. Christol, P., Taalat, R., Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Giard, E., et Ribet-Mohamed, I. (2012). InAs/GaSb superlattice pin photodiode : choice of the SL period to enhance the temperature operation in the MWIR domain. Papier invité. *SPIE Photonics West 2013, San Francisco, USA*, Proc. SPIE 8631, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices X, 86312P
 18. Giard, E., Nghiem, B.-L., Caes, M., Tauvy, M., Ribet-Mohamed, I. Taalat, R., Delmas, M., Rodriguez, J.-B. et Christol, P.,(2013). IEEE International Conference on noise fluctuations (ICNF; Montpellier, Juin 2013). *IEEE International Conference on noise fluctuations (ICNF), Montpellier, France*
 19. Giard, E., Ribet-Mohamed, I., Delmas, M., Rodriguez, J.-B. et Christol, P. (2014). Influence of the InAs to GaSb thickness ratio on the radiometric performances of MWIR InAs/GaSb superlattice pin photodiodes. *QSIP Workshop, Santa Fe, USA*
 20. Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Taalat, R., Konczewicz, L., Desrat, W., Contre-ras, S., Giard, E., Ribet-Mohamed, I. et Christol, P. (2014). Midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode with a dopant-free pn junction. *QSIP Workshop, Santa Fe, USA*
 21. Giard, E., Ribet-Mohamed, I., Delmas, M., Rodriguez, J.-B. et Christol, P. (2014). Effect of the InAs to GaSb thickness ratio on the quantum efficiency of T2SL MWIR PIN photodiodes. *Compound Semiconductor Week, Montpellier, France*
 22. Delmas, M., Taalat, R., Rodriguez, J.-B., Christol, P., Giard, E., Ribet-Mohamed, I., Imbert, J., Derelle, S. et Trinité, V. (2014). Analysis of electrical and electro-optical characteristics of midwave infrared InAs/GaSb SL pin photodiodes. Papier invité *SPIE Photonics West 2014, San Francisco, USA*
 23. Giard, E., Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Christol, P., Jaeck, J. et Ribet-Mohamed, I. (2014). Comparison of the electro-optical performances of MWIR InAs/GaSb superlattice pin photodiode and FPA with asymmetrical designs. *SPIE Defense and Security 2014, Baltimore, USA*

24. Christol, P., Delmas, M., Rodriguez, J.-B., Giard, E., Ribet-Mohamed, I. Imbert, J., Derelle, S. et Trinité, V. (2015). InAs/GaSb superlattice pin photodiode : choice of the SL period to enhance the temperature operation in the MWIR domain. Papier invité. *SPIE Photonics West 2015, San Francisco, USA*, Proc. SPIE 9370, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII, 93701Z

7.4 RAPPORTS INTERNES (NON CLASSIFIÉS)

1. Thetas, S., Guérineau, N. et Ribet-Mohamed, I. (2006). Validation dans le domaine visible d'une technique d'amélioration de la résolution spectrale d'un spectromètre statique à transformée de Fourier. *RT 2/10267 DOTA*
2. Ribet-Mohamed, I. (2007). Caractérisation électro-optique d'un composant MPQ faible bruit de l'institut Fraunhofer. *RF 1/08503 DOTA*
3. Ribet-Mohamed, I. (2009). Perspectives d'évolution du banc de réponse angulaire BRASIL. *RT 2/13527 DOTA*
4. Ribet-Mohamed, I. (2009). Analyse des potentialités de la technologie super-réseau pour les détecteurs infrarouge . *RTS 2/13262 DOTA*
5. Ribet-Mohamed, I. (2009). Analyse des potentialités de la technologie super-réseau pour les détecteurs infrarouge . *RF 3/13262 DOTA*
6. Ribet-Mohamed, I. (2009). Action Thématique "Détection" : bilan des activités 2008 . *RTI 3/13527 DOTA*
7. Ribet-Mohamed, I. (2010). Action Thématique "Détection et Nouveaux Concepts Optiques Passifs" : bilan des activités 2009. *RTI 2/14528 DOTA*
8. Ribet-Mohamed, I. (2011). Action thématique "Détection et Nouveaux Concepts Optiques Passifs" : bilan des activités 2010. *RTS 1/16473 DOTA*
9. Ribet-Mohamed, I. (2011). Assistance technique à Ulis. *RA 1/19325 DOTA*
10. Ribet-Mohamed, I. (2013). Caractérisations électro-optiques des performances ultimes de détecteurs infrarouge : rapport final sur RGC-DSG 2012 "détecteurs". *RT 1/19607 DOTA*
11. Ribet-Mohamed, I., Jaeck, J., Caes, M. et Bernhardt, S. (2014). RGC-DSG / DOTA - Détecteurs infrarouge 2013 : Rapport final. *RTS 1/20932 DOTA*
12. Ribet-Mohamed, I., Derelle, S. et Guérineau, N. (2015). RGC-DSG / DOTA - Détecteurs infrarouge 2014 : Rapport final. *RT 1/22648 DOTA*

7.5 THÈSES PARTIELLEMENT ENCADRÉES / DIRIGÉES

☞ Judikaël Le Rouzo

- Sujet : Etude expérimentale et théorique de la réponse angulaire et de la réponse spectrale hors bande de détecteurs infrarouge hautes performances
- Direction de thèse : Yann Boucher (ENIB) (20%)
- Encadrement à l'ONERA : Isabelle Ribet (80%)
- Collaboration : Institut fraunhofer-IAF
- Soutenance : 2007, à l'Ecole Polytechnique
- Financement : bourse DGA 2004-2007
- Situation actuelle : Maître de conférences, Université d'Aix-Marseille

☞ Emmanuel Lhuillier

- Sujet : Transport électronique dans les super-réseaux : applications aux détecteurs infrarouge à grandes longueurs d'onde
- Codirection de thèse Emmanuel Rosencher (ONERA) et Vincent Berger (Paris-VII) (10% - 10%)
- Encadrement à l'ONERA : Isabelle Ribet (80%)
- Collaboration : Paris VII et le III-V Lab
- Soutenance : 2010, à l'Ecole Polytechnique
- Financement : bourse DGA 2007-2010
- Situation actuelle : poste CNRS à l'ESPCI

☞ Cyril Cervera

- Sujet : Le photodétecteur à superréseau InAs/GaSb pour imagerie infrarouge
- Direction de thèse : Philippe Christol (40%)
- Codirection de thèse : Jean-Baptiste Rodriguez (40%)
- Codirection de thèse : Isabelle Ribet (20%)
- Collaboration : IES
- Soutenance : 2011, à l'université de Montpellier
- Financement : Bourse DGA 2008-2011
- Situation actuelle : en CDI au CEA/LETI

☞ Rachid Taalat

- Sujet : Réalisation et caractérisation électro-optique de photodétecteurs infrarouges à superréseaux InAs/GaSb
- Direction de thèse : Philippe Christol (40%)
- Codirection de thèse : Jean-Baptiste Rodriguez (40%)
- Codirection de thèse : Isabelle Ribet (20%)
- Collaboration : IES
- Soutenance : 2013, à l'université de Montpellier
- Financement : Bourse DGA 2010-2013
- Situation actuelle : en CDI à Sofradir

- ✉ Edouard Giard
 - Sujet : Caractérisation et orientation de la filière des détecteurs infrarouge à super-réseau InAs/GaSb
 - Direction de thèse : Philippe Christol (20%)
 - Codirection de thèse : Isabelle Ribet (80%)
 - Collaboration : IES
 - Soutenance : 30 septembre 2015, à l'Ecole Polytechnique
 - Financement : Bourse ONERA 2012-2015

- ✉ Jean Nghiem-Xuan
 - Sujet : Etude et optimisation de détecteurs infrarouges "super-réseaux" pour l'infrarouge lointain
 - Direction de thèse : Riad Haïdar (15%)
 - Codirection de thèse : Philippe Christol (15%) et Isabelle Ribet (70%)
 - Collaboration : IES
 - Soutenance : prévue en 2018
 - Financement : Bourse 50% DGA, 50% Labex FOCUS

7.6 POST-DOC ENCADRÉ

- ✉ Katarzyna Jaworowicz
 - Sujet : Caractérisation de détecteurs infrarouge à super-réseau InAs/GaSb
 - Encadrement : Isabelle Ribet (100%)
 - Collaboration : IES
 - Durée : 2 ans (janvier 2009 – février 2011)
 - Financement : IES (1 an), puis ONERA (1 an)

7.7 STAGES ENCADRÉS

- ✉ Nicolas Trimbou (2001), Ecole Polytechnique : Modélisation des détecteurs à multipuits quantiques
- ✉ Judikaël Le Rouzo (2004), ENSSAT : Caractérisation électro-optique de détecteurs à multi-puits quantiques
- ✉ Emmanuel Lhuillier (2007), ESPCI : Transport électronique dans les QWIP à haute longueur d'onde.
- ✉ David Tayibi (2011), université de Montpellier : Caractérisation électro-optique de détecteurs infrarouge à super-réseau
- ✉ Edouard Giard (2012), Télécom Bretagne : Caractérisation électro-optique de détecteurs infrarouge à super-réseaux
- ✉ Bich-Lien Nghiem (2013), Polytech Paris Sud : Mesure de bruit dans les détecteurs infrarouge à super-réseaux

BIBLIOGRAPHIE

- AIFER, E., TISCHLER, J., WARNER, J., VURGAFTMAN, I., BEWLEY, W., MEYER, J., KIM, J., WHITMAN, L., CANEDY, C. et JACKSON, E. (2006). W-structured type-ii superlattice long-wave infrared photodiodes with high quantum efficiency. *Applied physics letters*, 89(5):053519–053519. (Ref. citée page 45.)
- BOUCHER, Y. G., LE ROUZO, J., RIBET, I., HAÏDAR, R. et GUÉRINEAU, N. (2006). Description matricielle de l'anisotropie de la transition inter-sous-bande d'une structure à multi-puits quantiques. In *Journal de Physique IV (Proceedings)*, volume 135, pages 99–101. EDP sciences. (Ref. citée page 26.)
- BOUCHER, Y. G., LE ROUZO, J., RIBET-MOHAMED, I. et HAÏDAR, R. (2008). Modified form birefringence in periodic multilayer structures including uniaxial anisotropic materials. *JOSA B*, 25(5):777–784. (Ref. citée page 26.)
- CERVERA, C. (2011). *Le photodétecteur à superréseau InAs/GaSb pour imagerie infrarouge*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II. (Ref. citée pages 39, 40 et 41.)
- CERVERA, C., JAWOROWICZ, K., AÏT-KACI, H., CHAGHI, R., RODRIGUEZ, J.-B., RIBET-MOHAMED, I. et CHRISTOL, P. (2011). Temperature dependence performances of inas/gasb superlattice photodiode. *Infrared Physics & Technology*, 54(3):258–262. (Ref. citée page 39.)
- CERVERA, C., RIBET-MOHAMED, I., TAALAT, R., PEREZ, J., CHRISTOL, P. et RODRIGUEZ, J. (2012). Dark current and noise measurements of an inas/gasb superlattice photodiode operating in the midwave infrared domain. *Journal of electronic materials*, 41(10):2714–2718. (Ref. citée page 39.)
- CHEN, G., HADDADI, A., HOANG, A.-M., CHEVALLIER, R. et RAZEGHI, M. (2015). Demonstration of type-II superlattice MWIR minority carrier unipolar imager for high operation temperature application. *Optics letters*, 40(1):45–47. (Ref. citée pages 51, 53 et 54.)
- CHRISTOL, P., CERVERA, C., CHAGHI, R., AIT-KACI, H., RODRIGUEZ, J., KONCZEWICZ, L., CONTRERAS, S., JAWOROWICZ, K. et RIBET-MOHAMED, I. (2010). Electronic properties of InAs/GaSb superlattice detectors to evaluate high-temperature operation. In *OPTO*, pages 76081U–76081U. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 40.)
- CHRISTOL, P., CERVERA, C., RODRIGUEZ, J.-B., JAWOROWICZ, K. et RIBET-MOHAMED, I. (2011). Asymmetric InAs/GaSb superlattice pin photodiode to improve temperature operation. In *SPIE OPTO*, pages 79451H–79451H. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 40.)

- CONNELLY, B. C., METCALFE, G. D., SHEN, H. et WRABACK, M. (2010). Direct minority carrier lifetime measurements and recombination mechanisms in long-wave infrared type ii superlattices using time-resolved photoluminescence. *Applied Physics Letters*, 97(25):251117. (Ref. citée page 46.)
- COUDRAIN, C., BERNHARDT, S., CAES, M., DOMEL, R., FERREC, Y., GOUYON, R., HENRY, D., JACQUART, M., KATTNIG, A., PERRAULT, P., POUTIER, L., ROUSSET-ROUVIÈRE, L., TAUVY, M., THÉTAS, S. et PRIMOT, J. (2015). SIELETTERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures. *Optics Express*, 23(12):16164–16176. (Ref. citée page 29.)
- DE ROSSI, A., COSTARD, E., GUERINEAU, N. et ROMMELUERE, S. (2003). Effect of finite pixel size on optical coupling in QWIPs. *Infrared physics & technology*, 44(5):325–330. (Ref. citée page 26.)
- DELMAS, M., RODRIGUEZ, J., TAALAT, R., KONCZEWICZ, L., DESRAT, W., CONTRE-RAS, S., GIARD, E., RIBET-MOHAMED, I. et CHRISTOL, P. (2014). Midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode with a dopant-free p-n junction. *Infrared Physics & Technology*, 70:76–80. (Ref. citée page 45.)
- FOWLER, R. et NORDHEIM, L. (1928). Field emission from metallic surfaces. *In Proc. R. Soc. London, Ser. A*, volume 119, pages 173–181. (Ref. citée page 13.)
- GIARD, E. (2015). *Caractérisation et orientation de la filière des détecteurs infrarouge à superréseau InAs/GaSb*. Thèse de doctorat. (Ref. citée pages 19, 22, 24, 48 et 51.)
- GIARD, E., RIBET-MOHAMED, I., DELMAS, M., RODRIGUEZ, J. et CHRISTOL, P. (2014a). Influence of the p-type doping on the radiometric performances of MWIR InAs/GaSb superlattice photodiodes. *Infrared Physics & Technology*, 70:103–106. (Ref. citée pages 49 et 50.)
- GIARD, E., RIBET-MOHAMED, I., JAECK, J., VIALE, T., HAÏDAR, R., TAALAT, R., DELMAS, M., RODRIGUEZ, J.-B., STEVELER, E., BARDOU, N. *et al.* (2014b). Quantum efficiency investigations of type-II InAs/GaSb midwave infrared superlattice photodetectors. *Journal of Applied Physics*, 116(4):043101. (Ref. citée pages 45, 47 et 49.)
- GIARD, E., TAALAT, R., DELMAS, M., RODRIGUEZ, J.-B., CHRISTOL, P. et RIBET-MOHAMED, I. (2014c). Radiometric and noise characteristics of InAs-rich T2SL MWIR pin photodiodes. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 9. (Ref. citée pages 16, 18 et 21.)
- GUÉRINEAU, N. (1999). *Application du phénomène d'auto-imagerie à la caractérisation de matrices de détecteurs infrarouge*. Thèse de doctorat. (Ref. citée page 24.)
- HOANG, A., CHEN, G., CHEVALLIER, R., HADDADI, A. et RAZEGHI, M. (2014). High performance photodiodes based on inas/inassb type-ii superlattices for very long wavelength infrared detection. *Applied Physics Letters*, 104(25):251105. (Ref. citée page 54.)

- HOVEL, H. (1975). *Semiconductors and Semimetals*, volume 11, chapitre 2, pages 17–20. (Ref. citée page 45.)
- IMBERT, J., TRINITE, V., DERELLE, S., JAECK, J., GIARD, E., DELMAS, M., CARRAS, M., HAIDAR, R., RODRIGUEZ, J. et CHRISTOL, P. (2014). Electronic structure of InAs/GaSb superlattice for the modelling of MWIR pin photodiode. *Infrared Physics & Technology*, 70:81–86. (Ref. citée page 45.)
- JAWOROWICZ, K., CERVERA, C., GRAVRAND, O., RODRIGUEZ, J.-B., CHRISTOL, P. et RIBET-MOHAMED, I. (2010). Dark current and noise measurements in InAs/GaSb superlattice detectors. *In OPTO*, pages 76081T–76081T. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 40.)
- JAWOROWICZ, K., RIBET-MOHAMED, I., CERVERA, C., RODRIGUEZ, J.-B. et CHRISTOL, P. (2011). Noise characterization of midwave infrared InAs/GaSb superlattice pin photodiode. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 23(4):242–244. (Ref. citée pages 21, 40 et 42.)
- KARNI, Y., AVNON, E., EZRA, M. B., BERKOWITZ, E., COHEN, O., COHEN, Y., DOBROMISLIN, R., HIRSH, I., KLIN, O., KLIPSTEIN, P. et al. (2014). Large format 15 μ m pitch XBn detector. *In SPIE Defense+ Security*, pages 90701F–90701F. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 54.)
- KINCH, M. A. (2000). Fundamental physics of infrared detector materials. *Journal of Electronic Materials*, 29(6):809–817. (Ref. citée page 52.)
- KLEIN, B., GAUTAM, N., PLIS, E., SCHULER-SANDY, T., ROTTER, T. J., KRISHNA, S., CONNELLY, B. C., METCALFE, G. D., SHEN, P. et WRABACK, M. (2014). Carrier lifetime studies in midwave infrared type-II InAs/GaSb strained layer superlattice. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 32(2):02C101. (Ref. citée pages 46 et 52.)
- KLIPSTEIN, P. (2015). Xb n n and xb p p infrared detectors. *Journal of Crystal Growth*. (Ref. citée page 54.)
- LE ROUZO, J. (2007). *Etude expérimentale et théorique de la réponse angulaire et de la réponse spectrale hors bande de détecteurs infrarouges hautes performances*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique. (Ref. citée pages 13, 14, 17 et 26.)
- LE ROUZO, J., RIBET-MOHAMED, I., GUÉRINEAU, N., HAÏDAR, R., TAUUVY, M., ROSENCHER, E. et CHUANG, S. (2006a). Van hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *Applied physics letters*, 88(9):091117. (Ref. citée page 13.)
- LE ROUZO, J., RIBET-MOHAMED, I., HAIDAR, R., GUÉRINEAU, N., TAUUVY, M. et ROSENCHER, E. (2006b). Singularités de van hove des transitions inter sous-bande dans les détecteurs infrarouge à multipuits quantiques (mpq). *In Journal de Physique IV (Proceedings)*, volume 135, pages 215–217. EDP sciences. (Ref. citée page 13.)

- LE ROUZO, J., RIBET-MOHAMED, I., HAIDAR, R., TAUUVY, M., GUÉRINEAU, N., ROSENCHER, E. et CHUANG, S. (2007). Van hove singularities in intersubband transitions in multiquantum well photodetectors. *Infrared physics & technology*, 50(2):113–118. (Ref. citée page 13.)
- LHUILIER, E. (2010). *Transport électronique dans les super réseaux : applications aux détecteurs infrarouges à haute longueur d'onde*. Thèse de doctorat, Thèse de doctorat. (Ref. citée pages 28, 29 et 30.)
- LHUILIER, E., PÉRÉ-LAPERNE, N., RIBET-MOHAMED, I., ROSENCHER, E., PATRIARCHE, G., BUFFAZ, A., BERGER, V., NEDELUCU, A. et CARRAS, M. (2010a). Quantum well infrared photodetectors hardiness to the nonideality of the energy band profile. *Journal of Applied Physics*, 107(12):123110. (Ref. citée page 29.)
- LHUILIER, E., PÉRÉ-LAPERNE, N., ROSENCHER, E., RIBET-MOHAMED, I., NEDELUCU, A., DOYENNETTE, L. et BERGER, V. (2011). Dark current reduction in a long wavelength quantum well infrared photodetector operating at low temperature. *Infrared Physics & Technology*, 54(3):189–193. (Ref. citée page 28.)
- LHUILIER, E., RIBET-MOHAMED, I., NEDELUCU, A., BERGER, V. et ROSENCHER, E. (2009a). Quantum transport in quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Infrared Physics & Technology*, 52(6):247–251. (Ref. citée page 28.)
- LHUILIER, E., RIBET-MOHAMED, I., NEDELUCU, A., BERGER, V. et ROSENCHER, E. (2010b). Quantum transport in weakly coupled superlattices at low temperature. *Physical Review B*, 81(15):155305. (Ref. citée page 28.)
- LHUILIER, E., RIBET-MOHAMED, I., PÉRÉ-LAPERNE, N., TAUUVY, M., DESCHAMPS, J., NEDELUCU, A. et ROSENCHER, E. (2010c). 15 μ m quantum well infrared photodetector for thermometric imagery in cryogenic windtunnel. *Infrared Physics & Technology*, 53(6):425–429. (Ref. citée page 31.)
- LHUILIER, E., RIBET-MOHAMED, I., ROSENCHER, E., PATRIARCHE, G., BUFFAZ, A., BERGER, V. et CARRAS, M. (2010d). Interface roughness transport in terahertz quantum cascade detectors. *Applied Physics Letters*, 96(6):061111. (Ref. citée page 29.)
- LHUILIER, E., RIBET-MOHAMED, I., TAUUVY, M., NEDELUCU, A., BERGER, V. et ROSENCHER, E. (2009b). Ultimate performance of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Infrared Physics & Technology*, 52(4):132–137. (Ref. citée page 28.)
- LHUILIER, E., ROSENCHER, E., RIBET-MOHAMED, I., NEDELUCU, A., DOYENNETTE, L. et BERGER, V. (2010e). Quantum scattering engineering of quantum well infrared photodetectors in the tunneling regime. *Journal of Applied Physics*, 108(11):113707. (Ref. citée page 28.)

- MICHEL, E. et RAZEGHI, M. (1998). Recent advances in Sb-based materials for uncooled infrared photodetectors. *Optoelectronics review*, pages 11–24. (Ref. citée page 45.)
- MURRAY, L., LOKOVIC, K., OLSON, B., YILDIRIM, A., BOGGESS, T. et PRINEAS, J. (2014). Effects of growth rate variations on carrier lifetime and interface structure in InAs/GaSb superlattices. *Journal of Crystal Growth*, 386:194–198. (Ref. citée pages 46 et 52.)
- POUR, S. A., HUANG, E.-W., CHEN, G., HADDADI, A., NGUYEN, B.-M. et RAZEGHI, M. (2011). High operating temperature midwave infrared photodiodes and focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattices. *Applied Physics Letters*, 98(14):143501. (Ref. citée pages 54 et 56.)
- REIBEL, Y., TAALAT, R., BRUNNER, A., RUBALDO, L., AUGHEY, T., KERLAIN, A., PÉRE-LAPERNE, N., MANISSADJIAN, A., GRAVRAND, O., CASTELEIN, P. *et al.* (2015). Infrared swap detectors : pushing the limits. In *SPIE Defense+ Security*, pages 945110–945110. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 55.)
- RIBET, I. (2001). *Oscillateurs paramétriques optiques à cavités imbriquées pour l'étude des réseaux dynamiques créés par mélange à quatre ondes résolu en temps*. Thèse de doctorat. (Ref. citée page 8.)
- RIBET-MOHAMED, I., GUÉRINEAU, N., SUFFIS-CARRETERO, S., TAUUVY, M., DE ROSSI, A., COSTARD, E. et BOIS, P. (2005a). Effect of oblique incidence on the spectral response of quantum well infrared photodetectors. *Journal of applied physics*, 97(2):023106. (Ref. citée page 15.)
- RIBET-MOHAMED, I., JAWOROWICZ, K., TAYIBI, D., CERVERA, C., TAALAT, R., RODRIGUEZ, J.-B. et CHRISTOL, P. (2011). Noise performance analysis of MWIR InAs/GaSb superlattice pin photodiodes. In *SPIE Defense, Security, and Sensing*, pages 80120Z–80120Z. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 40.)
- RIBET-MOHAMED, I., LE ROUZO, J., ROMMELUERE, S., TAUUVY, M. et GUÉRINEAU, N. (2005b). Advanced characterization of the radiometric performances of quantum well infrared photodetectors. *Infrared physics & technology*, 47(1):119–131. (Ref. citée page 25.)
- RODRIGUEZ, J.-B. (2005). *Superréseaux InAs/GaSb réalisés par épitaxie par jets moléculaires pour photodétection à 300 K dans le moyen-infrarouge*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc. (Ref. citée pages 35 et 38.)
- RUBALDO, L., BRUNNER, A., GUINEDOR, P., TAALAT, R., BERTHOZ, J., SAM-GIAO, D., KERLAIN, A., DARGENT, L., PÉRE-LAPERNE, N., CHAFFRAIX, V. *et al.* (2016). Recent advances in sofradir ir on ii-vi photodetectors for hot applications. In *SPIE OPTO*, pages 97551X–97551X. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée page 56.)

- STEENBERGEN, E., CONNELLY, B., METCALFE, G., SHEN, H., WRABACK, M., LUBY-SHEV, D., QIU, Y., FASTENAU, J., LIU, A., ELHAMRI, S. *et al.* (2011). Significantly improved minority carrier lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb. *Applied physics letters*, 99(25):251110. (Ref. citée page 42.)
- SVENSSON, S. P., DONETSKY, D., WANG, D., MALONEY, P. et BELENKY, G. (2010). Carrier lifetime measurements in InAs/GaSb strained layer superlattice structures. In *SPIE Defense, Security, and Sensing*, pages 76601V–76601V. International Society for Optics and Photonics. (Ref. citée pages 46 et 52.)
- TAALAT, R. (2013). *Réalisation et caractérisation électro-optique de photodétecteurs infrarouge à superréseau InAs/GaSb*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2. (Ref. citée pages 41, 43 et 44.)
- TAALAT, R., RODRIGUEZ, J., CERVERA, C., RIBET-MOHAMED, I. et CHRISTOL, P. (2013). Electrical characterizations of asymmetric InAs/GaSb superlattice MWIR photodiodes. *Infrared Physics & Technology*, 59:32–35. (Ref. citée page 41.)
- TENNANT, W. (2010). “Rule 07” revisited : still a good heuristic predictor of p/n HgCdTe photodiode performance? *Journal of Electronic Materials*, 39(7):1030–1035. (Ref. citée pages 51 et 53.)
- VAN HOVE, L. (1953). The occurrence of singularities in the elastic frequency distribution of a crystal. *Physical Review*, 89(6):1189. (Ref. citée page 13.)

Orientation de filières émergentes en détection infrarouge

Ce mémoire présente l'essentiel de mes travaux de recherche sur l'orientation des filières émergentes en détection infrarouge. Après une brève présentation du contexte, je présente les outils que j'ai contribué à développer au travers des travaux de thèse ou de post-doc que j'ai encadrés : en l'occurrence, cinq bancs de tests et trois modèles. Je prends ensuite l'exemple concret de la filière super-réseaux, dont je pilote l'orientation à l'ONERA depuis dix ans maintenant.

Cette mission m'a permis de mettre en place une démarche scientifique sur le long terme, qui s'articule autour de la collaboration nouée avec l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) de l'université de Montpellier. Les résultats obtenus me permettent de conclure sur le potentiel de cette filière émergente dans la bande spectrale 3 - 5 μ m et de définir de nouveaux axes de recherche pour les années à venir. Je termine ce mémoire par la description des activités d'enseignement que j'ai menées en parallèle de mon travail de recherche, elles aussi centrées sur la détection infrarouge.

Mots-clés : DETECTEUR INFRAROUGE ; ORIENTATION ; CARACTERISATION OPTIQUE ; RENDEMENT QUANTIQUE ; REPONSE ANGULAIRE ; REPONSE SPECTRALE ; SUPERRESEAU

Orientation of emerging technologies for infrared detection

This manuscript presents an overview of my research activities dedicated to the orientation of emerging technologies for infrared detection. It begins with a brief description of the context, followed by a presentation of the five experimental test benches and the three modelling tools that were developed under my supervision. Then, the concrete example of the InAs/GaSb type-II superlattice technology is described into detail, since I had the opportunity to drive the orientation of this emerging technology from the very beginning, ten years ago.

This mission allowed me to put in place a long-term scientific approach, based on a fruitful collaboration with the Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) from university of Montpellier. The results we obtained allow us to rule on the potential of this emerging technology to address the 3 - 5 μ m spectral band and to define new axes of research for the years to come. To finish with, my teaching activities, which also focus on infrared detection, are described.

Keywords : INFRARED DETECTORS ; ELECTRO-OPTIC CHARACTERIZATION ; QUANTUM EFFICIENCY ; ANGULAR RESPONSE ; TYPE-II SUPERLATTICE DETECTORS