

LES INTERVENANTS

Ludovic Bellon
directeur de recherche au CNRS
Laboratoire de Physique, ENS de Lyon

Orphée Cugat
Directeur de recherche,
G2elab, CNRS

Olivier Haerberlé
Professeur des Universités
Université de Haute-Alsace
IRIMAS

Sandrine Voros
Directrice de Recherche,
Inserm

9^e COLLOQUE INTERDISCIPLINAIRE EN INSTRUMENTATION C2i

GRENOBLE - 25, 26 ET 27 JANVIER 2023

COMITÉ D'ORGANISATION

Aktham Asfour
G2ELab, Université Grenoble Alpes

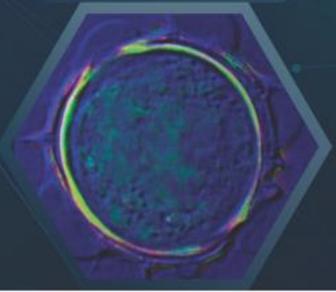
Olivier Jacquin
LIPhy, Université Grenoble Alpes

Corinne Felix
Institut Néel, CNRS

Benjamin Cross
LIPhy, Université Grenoble Alpes



INSCRIPTIONS SUR :
WWW.C2I-2023.SCIENCESCONF.ORG



Programme (4 présentations invitées, 27 présentations orales + 4 posters)

Présentations invitées (4) :

- **Orphée CUGAT** : « from magnetic microsystems to point-of-care disease screening : magIA diagnostics ».
- **Ludovic BELLON** : « micro- et nano-mécanique : faire du bruit un outil de mesure ».
- **Olivier HAEBERLE** : « microscopie tomographique diffractive ».
- **Sandrine VOROS** : « gestes médicaux chirurgicaux assistés par ordinateur ».

Instrumentation embarquée dans le ciel ou l'espace (4 présentations)

- (1) Vers un internet quantique global : Développement d'un démonstrateur satellitaire pour un réseau de distribution d'intrication quantique
Erik KERSTEL
- (2) ThingSat : une passerelle LoRa spatiale pour objets connectés terrestres
Olivier ALPHAND, Thierry SEQUIES, Didier DONSEZ, Tan-Phu VUONG, Jean-Louis MONIN, Aymeric BROCHIER, Imane El KHANTOUTI
- (3) AMICal Sat : un instrument en orbite
Thierry SEQUIES, Mathieu BARTHELEMY, Élisabeth ROBERT, Vincent GRENNERAT, Jean-Jacques CORREIA
- (4) QlevEr Sat : charge utile avec IA embarquée pour observer la Terre
Tania MCNAMARA, Jean-Louis MONIN, Mathieu BARTHELEMY, Lian APOSTOL, Thierry SEQUIES, Jocelyn CHANUSSOT

Mesures de couches minces (3 présentations)

- (5) Caractérisation de l'homogénéité des couches minces transparentes à l'aide d'ellipsométrie en réflexion et en transmission pour les applications optiques et mécaniques.
Herve PIOMBINI, Océane GUILLOT, Amira GUEDICHE, Mathieu LAFARIE, Amandine MOINY, Théo BROCKHOUSE
- (6) Mesure par interférométrie à faible cohérence de la dépendance en longueur d'onde du coefficient de réflexion complexe d'un traitement antireflets
Michel LEQUIME, Imran KHAN, Myriam ZERRAD, Claude AMRA
- (7) Métrologie d'absorption des composants optiques en couche mince interférentiel pour les lasers de forte puissance continue. *Camille PETITE, Mathias SOULIER, Jeanne GRAISSET, Antonin MOREAU, Hélène KROL, Catherine GREZES-BESSET, Julien LUMEAU, Laurent GALLAIS*

Imagerie holographique/mesure de front d'onde (3 présentations)

- (8) Imagerie holographique numérique multi-vues de champs acoustiques
Saoucene HASSAD, Kouider FERRIA, Larbi BOUAMAMA, Pascal PICART
- (9) Méthode d'holographie numérique bi-couleur pour le diagnostic in-situ en fabrication additive laser
Matthieu PINIARD, Béatrice SORRENTE, Pascal PICART
- (10) Implementation of the crossed-sine wavefront sensor
Yan FENG, François HENAULT, Alain SPANG, Laura Schreiber, Jean-jacques CORREIA, David MOUILLET, Eric STADLER, Yves MAGNARD, Thibaut MOULIN, Alain DELBOULBE

Traitement du signal – deep Learning (2 présentations)

- (11) Imagerie photoacoustique des vaisseaux sanguins avec correction des artéfacts de visibilité
Guillaume GODEFROY, Ivana FALCO, Charlotte CONSTANS, Bastien ARNAL, Emmanuel BOSSY
- (12) Détection de défauts de capteurs sur un banc d'essai acoustique par intelligence artificielle
Thibaut LE MAGUERESSE, François CRETOLLIER, Jérémie DERRE, Florent MERCAT

Mesures de déplacements (vibrométrie, vélocimétrie mesure de position) (3 présentations)

- (13) Accélérométrie, vélocimétrie et chronologie de la position de particules en mouvement dans l'espace avec l'imagerie à quatre dimensions
Alexis MATWYSCHUK, Nicolas METZGER
- (14) Vibromètre laser plein champ dans le domaine de Fourier
Éric LACOT
- (15) Caractérisation des erreurs périodiques d'interféromètres fibrés utilisés pour des mesures de déplacement sub-nanométriques.
Daniel FIOLE, Felix BRONEER, François VILLAR

Métrologie de la Terre, du Climat (4 présentations)

- (16) Etat de l'art des méthodes instrumentales de mesure de la salinité absolue de l'eau de mer
Marc LE MENN
- (17) Evolution of seismic technologies for oil exploration and new energy: potential applications to other domains
Nick MOLDOVEANU, Clément KOSTOV, Maurice NESSIM
- (18) Les défis de l'évaluation de la qualité des produits d'humidité du sol dérivées des observations du satellite SMOS à partir de mesures in-situ
François GIBON, Arnaud MIALON, Philippe RICHAUME, Yann KERR
- (19) Towards the submillimeter spectroscopy of the volatile metabolome emitted by the soil microorganisms
Daria GUDZ, François BONDU, Françoise BINET, Ludovic FREIN, Cyril HAMEL, Anthony CARRÉ, Steve BOUHIER

Spectrométrie embarquée (2 présentations)

- (20) Spectromètre Ultrasensible d'Isotopes de l'Eau pour les Mesures Atmosphériques à bord d'un Avion de ligne
Markus MILTNER, Tim STOLTMANN, Andreas ZAHN, Erik KERSTEL
- (21) Spectromètre SWIR miniature pour les applications in-situ et embarquées
Alain MORAND

Intégration des capteurs aux structures (2 présentations)

- (22) Instrumentation in-situ de matériaux synthétiques en impression 3D : insertion de capteurs de force et fibres optiques pour la mesure de déformation.
Delphine FAURE-CATTELOIN, Emilio ABI AAD, Marianne CONIN, Laura GAILLARD, Baptiste FENNETEAU, Olivier DECK
- (23) Capteur « patch » pour la caractérisation hydrique du béton de chanvre
Eric VOURC'H

Instrumentation et imagerie médicale

(24) Conception et mise en œuvre d'un capteur hyperfréquence large bande pour l'analyse non-invasive de tissus cancéreux cutanés

Zied FRITISS, Patrick POULICHET, Hakim TAKHEDMIT, Laurent LANQUETIN, Elodie RICHALOT, Olivier FRANCAIS

(25) Microscopie photoacoustique pour le diagnostic médical et la thérapie

Olivier HUGON

(26) Mesure photoacoustique de la densité de la vascularisation de ménisques humains

Paolo PARIS

Nouvelles méthodes pour les Essais & le Contrôle non Destructif

(27) Capteur passif multi-résonant pour la caractérisation radiofréquence et sans contact de solutions diélectriques représentatives de milieux organiques

Hana BOUKHAROUBA, Alexiane PASQUIER, Stéphane SERFATY, Pierre-Yves JOUBERT

(28) Conception d'une plateforme capteurs pour le contrôle et la sécurisation des procédés

Riadh LAKHMI, Jean-Paul VIRCELLE, Mathilde RIEU, Rouba ALRAMMOUZ

(29) Modélisation en mécanique des fluides par la méthode DPSM

Dominique PLACKO, Jean-Pierre BARBOT, Mehdi BRAHITI, Serge GOURLAOUEN

Posters :

(30) Dispositif d'imagerie métrologique dimensionnelle d'épaisseur sans contact de haute précision

CAMILLE BATAILLE, Philippe MOREAU, Aurélien GOURRIER

(31) Transmission d'information par isolation capacitive pour auto accord de fréquence, *Ming ZHANG,*

Nicolas LLASER

(32) Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy for highly sensitive in situ gas analysis,

Marianne BEAUMONT, Irène VENTRILLARD, Roberto GRILLI, Daniele ROMANINI

(34) Source de courant de précision à large bande pour l'excitation d'échantillons Biologiques vivants,

Jordan ROY, Patrick POULICHET, Lionel ROUSSEAU, Abir REZGUI, Olivier FRANCAIS

(1) Vers un internet quantique global : Développement d'un démonstrateur satellitaire pour un réseau de distribution d'intrication quantique

Erik Kerstel^{*1,2}, *Sacha Gressani*¹, *Laurent de Forges de Parny*³, *Mathias van den Bossche*³,
*Eleni Diamanti*⁴, *Patrick Gelard*⁵, *Sebastien Tanzilli*⁶, *and the CSUG Team*¹

¹Centre Spatial Universitaire de Grenoble, 38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPhy, 38000 Grenoble, France

³Thales Alenia Space, Toulouse, France

* erik.kerstel@univ-grenoble-alpes.fr

1. Introduction

Les technologies quantiques peuvent être considérées comme l'une des innovations les plus importantes de notre époque, avec un potentiel de développements révolutionnaires dans un certain nombre d'applications différentes. Ce que l'on appelle aujourd'hui la première révolution quantique s'est déroulée tout au long du XXe siècle. Elle a porté sur le comportement quantique des systèmes multi-particulaires et a conduit à des inventions comme le transistor et le laser, et nous a donné des concepts théoriques comme la dualité onde-particule. La deuxième révolution quantique est actuellement en cours [Dowling 2002]. Elle porte sur le comportement des particules individuelles, et du photon en particulier. Elle utilise la théorie de la mécanique quantique pour concevoir des systèmes, tels que des atomes artificiels « quantum dots » ou des systèmes intriqués présentant un niveau de corrélation non-locale supérieur à ce qui est classiquement possible, toutes choses qui étaient auparavant inimaginables. L'exploitation de la mécanique quantique permet d'effectuer des mesures à un niveau de précision qui n'est pas possible dans le monde classique et promet de traiter l'information de manière beaucoup plus efficace que dans le monde classique. L'une des prédictions les plus remarquables de la deuxième révolution quantique est celle de la faisabilité d'un réseau d'information quantique capable de distribuer l'intrication quantique entre différents points d'extrémité ("utilisateurs") [Castelvecchi 2018, Laurat 2018, Wehner 2018]. Un tel "internet quantique" permettra la détection basée sur l'intrication, la synchronisation des horloges et les mesures de physique quantique comme la détection des ondes gravitationnelles et l'interférométrie à très grande base, le tout avec une précision sans précédent. Il sera également l'épine dorsale de l'informatique quantique distribuée et en nuage.

Parmi les diverses technologies quantiques qui bénéficieraient d'un réseau d'information quantique, les communications quantiques sont considérées comme les plus matures. Le grand intérêt pour les communications quantiques sécurisées est une conséquence du développement rapide et accéléré de l'informatique quantique et du fait que des algorithmes efficaces existent déjà. En fait, Peter Shor a publié son algorithme quantique qui résout efficacement les problèmes de logarithme discret et de factorisation des nombres entiers en 1994 [Shor 1995]. Cela porte atteinte à la sécurité des cryptosystèmes actuellement les plus répandus, tels que RSA (Rivest, Shamir, Adleman), qui sont basés sur la difficulté de résoudre de tels problèmes de manière classique (avec une échelle exponentielle). Cette menace à long terme pour nos systèmes de sécurité peut avoir des répercussions redoutables sur notre société, car celle-ci est fortement tributaire du bon fonctionnement des infrastructures numériques, des services et de l'intégrité des données.

À titre d'exemple frappant, la distribution de clés quantiques (QKD), qui est la première technologie quantique commerciale, offre un moyen unique d'établir, à distance, des chaînes aléatoires identiques de bits secrets. Elle offre un niveau de sécurité de communication qui ne peut être obtenu par les moyens cryptographiques classiques. Les informations quantiques peuvent être codées de manière pratique, par exemple dans les états de temps-énergie ou de polarisation de photons uniques, et l'expérience est conçue de telle sorte que l'écoute clandestine de l'échange entraînerait nécessairement des erreurs détectables. La sécurité intrinsèque l'emporte largement sur les inconvénients de la complexité et du coût supplémentaires, du moins dans le cas de certaines infrastructures critiques. Le QKD a déjà prouvé sa praticité dans les mises en œuvre de réseaux de fibres optiques, pour lesquels des solutions commerciales sont disponibles. Toutefois, les pertes limitent la distance entre deux parties à quelques centaines de km, car le théorème de non-clonage interdit l'utilisation de simples amplificateurs optiques, tandis que les répéteurs quantiques restent

une solution extrêmement difficile. Dans un avenir prévisible, les satellites sont la seule option permettant d'échanger des clés secrètes à l'échelle mondiale, tout en limitant le nombre de nœuds relais de confiance dans le réseau. Le satellite chinois Micius est jusqu'à présent le seul à avoir joué le rôle de nœud de confiance dans un lien QKD global [Liao 2018] et de nœud non-fiable dans une démonstration de QKD basée sur l'intrication sur ~1200 km [Yin 2017].

2. Un démonstrateur satellitaire

Nous rendons compte ici de nos efforts pour développer un démonstrateur satellitaire de distribution d'intrication entre deux stations terrestres optiques quantiques. Dans un premier temps, nous avons défini et réalisé au CSUG une analyse de faisabilité d'une mission nanosatellitaire appelée NanoBob (un CubeSat de 12 unité, pesant moins de 10 kg) [Kerstel 2018].

NanoBob doit démontrer le QKD entre une station terrestre optique (OGS) et le nanosatellite. En gardant la source de photons intriqués au sol, le segment spatial est moins complexe, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie, de réduire l'encombrement et d'améliorer la fiabilité, le tout à un coût moindre, en particulier lorsque plusieurs satellites desservent un nombre limité d'OGS. La charge utile du segment spatial est également polyvalente : le récepteur est compatible avec plusieurs protocoles QKD et d'autres expériences de physique quantique. Afin d'étendre la portée géographique des OGS à l'échelle métropolitaine et le nombre d'utilisateurs finaux pouvant exploiter le même OGS, nous concevons un réseau quantique synchronisé "plug-and-play", démontrant ainsi une infrastructure complète pour la QKD à l'échelle mondiale et métropolitaine. Nous discuterons du concept de la mission et des résultats des études de définition et de faisabilité. En particulier, nous discuterons de plusieurs défis technologiques clés et des solutions proposées.

Dans une prochaine étape vers un réseau d'information quantique par satellite (RIQS), nous avons réalisé une étude détaillée des pertes atmosphériques et optiques du système à double liaison et de leur effet sur les indicateurs clés de performance d'un démonstrateur de distribution d'intrication par satellite, dans lequel le satellite contient une source de paires de photons intriqués et envoie un photon de la paire à une station terrestre optique près de Paris, et l'autre à une seconde station à Calern (Côte d'Azur). Les résultats de cette étude, rapportés ici, ont permis d'identifier les composants critiques du système, tels que les systèmes de détection de photons uniques et les sources de paires de photons intriqués, ainsi que leurs exigences.

3. Références

- Castelvechhi, Davide. 2018. "The Quantum Internet Has Arrived (and It Hasn't) (The Entangled Web)." *Nature* 554 (7692): 289–92.
- Dowling, Jonathan P., and Gerard J. Milburn. 2003. "Quantum Technology: The Second Quantum Revolution." Ed. A. MacFarlane. *Phil. Trans. Royal Soc. London. Series A* 361 (1809): 1655–74.
- Kerstel, Erik, Arnaud Gardelein, Mathieu Barthelemy, The CSUG Team, Matthias Fink, Siddarth Koduru Joshi, and Rupert Ursin. 2018. "Nanobob: A CubeSat Mission Concept for Quantum Communication Experiments in an Uplink Configuration." *EPJ Quantum Technology* 5 (1): 6.
- Laurat, Julien. 2018. "On-Demand Entanglement Could Lead to Scalable Quantum Networks." *Nature* 558 (7709): 192–93.
- Liao, Sheng-Kai, Wen-Qi Cai, Johannes Handsteiner, Bo Liu, Juan Yin, Liang Zhang, Dominik Rauch, et al. 2018. "Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network." *Physical Review Letters* 120 (3): 030501.
- Yin, Juan, Yuan Cao, Yu-Huai Li, Sheng-Kai Liao, Liang Zhang, et al. 2017. "Satellite-Based Entanglement Distribution over 1200 Kilometers." *Science* 356 (6343): 1140–44.
- Shor, Peter W. 1995. "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer." *ArXiv* 9508027v2.
- Wehner, Stephanie, David Elkouss, and Ronald Hanson. 2018. "Quantum Internet: A Vision for the Road Ahead." *Science* 362 (6412): eaam9288.
4. **CSUG Team.** L'équipe est composée des ingénieurs, étudiants et éducateurs suivants, qui ont tous contribué à différentes étapes de l'étude actuelle. **NanoBob** : Y Gilot, J Rodrigo, G Bourdarot, V Borne, J-Y Burlet, A Christidis, J Segura, J-M Niot, M Bouzat, M Barthelemy, E LeCoarer, T Sequies, B Boulanger, V Boutou, M Chabanol, L Fesquet, H Fourati, R Bastos, B Robu, S Toru. **RIQS** : J Debaud, A Metrat, F Montagne, P Payreaudau, J-L Monin.

(2) ThingSat : une passerelle LoRa spatiale pour objets connectés terrestres

Olivier ALPHAND, Didier DONSEZ, Aymeric BROCHIER⁽¹⁾, Tan-Phu VUONG⁽²⁾ Imane EL KHANTOUTI, Thierry SEQUIES, Jean-Louis MONIN⁽³⁾

(1) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, LIG, 38000 Grenoble, France

(2) IMEP-LAHC Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP Grenoble, France

(3) CSUG, Université Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France

(1)(2)(3) prenom.nom@univ-grenoble-alpes.fr

1. Introduction

Conduit par le CSUG (Centre Spatial Universitaire de Grenoble) avec le LIG (équipes ERODS et DRAKKAR) et l'IMEP-LAHC, le projet ThingSat a pour objectif de démontrer la fiabilité des protocoles de communications longue distance et basse consommation énergétique s'appuyant sur la modulation radio [LoRa](#) [1] entre une constellation de cubesats et des objets au sol, isolés de tout réseau terrestre (Internet mais aussi électrique).

2. Les avancées du projet ThingSat

Le projet Thingsat a démarré courant 2019 avec des tests de performance radio au moyen d'objets LoRa embarqués dans des ballons stratosphériques du CNES (Mai 2019, Septembre 2020, Avril 2021). Les résultats montrent des communications LoRa à très longues distances (> 600 kms) en atmosphère (jusqu'à 32 kms d'altitude) sur les bandes de fréquence ISM 433 MHz, 868 MHz et 2400 MHz.

En Décembre 2019, le LIG, l'IMEP-LaHC et le CSUG ont constitué un consortium académique et industriel pour financer la réalisation et la mise en orbite d'une carte de communication LoRa (d'une dimension d'un ¼ U) et une antenne patch bi-bande pour cubesat.

Cette **carte de communication** pour cubesat est à la fois une station LoRa 868 Mhz avec un concentrateur Semtech SX1302 et un terminal LoRa 2.4 GHz avec un transmetteur Semtech SX1280. Son design et sa réalisation ont été effectués durant l'année 2021. En parallèle, le **logiciel embarqué** sur la carte a été développé avec [RIOT OS](#) afin de supporter de nombreux types de scénarios ainsi que le support de mises à jour "over-the-space". L'**antenne patch bi-bande** a également été réalisée durant l'année 2021.

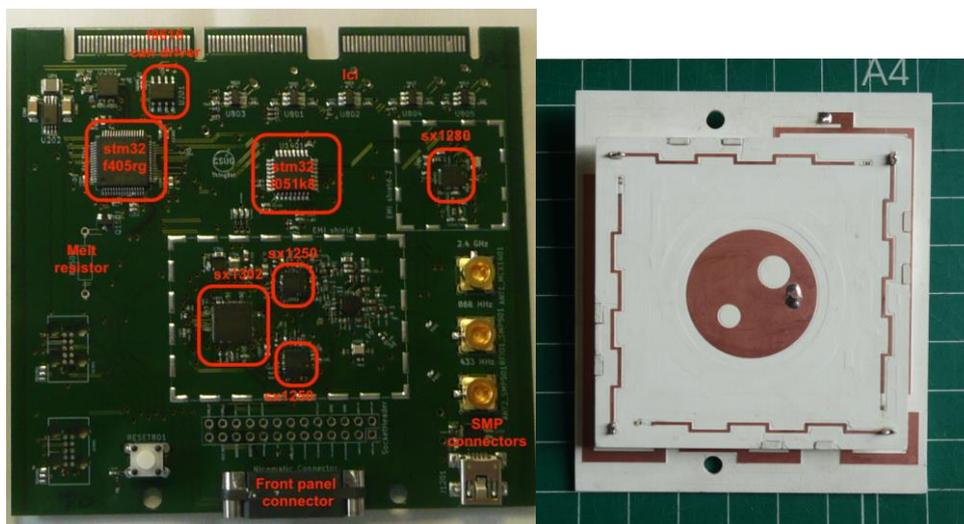


Figure 1. La carte de communication ThingSat et son antenne patch bi-bande

La carte Thingsat est hébergée en charge invitée dans la mission commerciale STORK du plateforme [SatRevolution](#). Le cubesat STORK-1 a été lancé en orbite basse le 13 Janvier 2022 par Falcon 9 de SpaceX et son transporteur D-Orbit l'a placé à une orbite héliosynchrone à ~525km d'altitude le 31 janvier 2022.

Au 10/11/2022, la phase de mise en service (ie commissioning) des composants systèmes de STORK-1 est terminée. Les équipes de SatRev s'occupent désormais de la mise en service des charges invitées (dont la charge Thingsat).

3. L'architecture ThingSat support aux expérimentations

La Figure 1 résume les principales caractéristiques (en terme d'orbite et de communication) d'un scénario ThingSat. On remarquera notamment que le cubesat est doté d'un système de contrôle d'attitude permettant à ce dernier de pointer en permanence vers le centre de la Terre (i.e. Nadir). Le calcul du bilan de liaison nous permet d'espérer des fenêtres de visibilité du cubesat de l'ordre de 3 min pour chaque passage. De par son orbite, le cubesat effectuera 4 à 5 passages par jour au dessus d'une même zone (l'empreinte au sol étant de l'ordre d'un diamètre de 1000km).

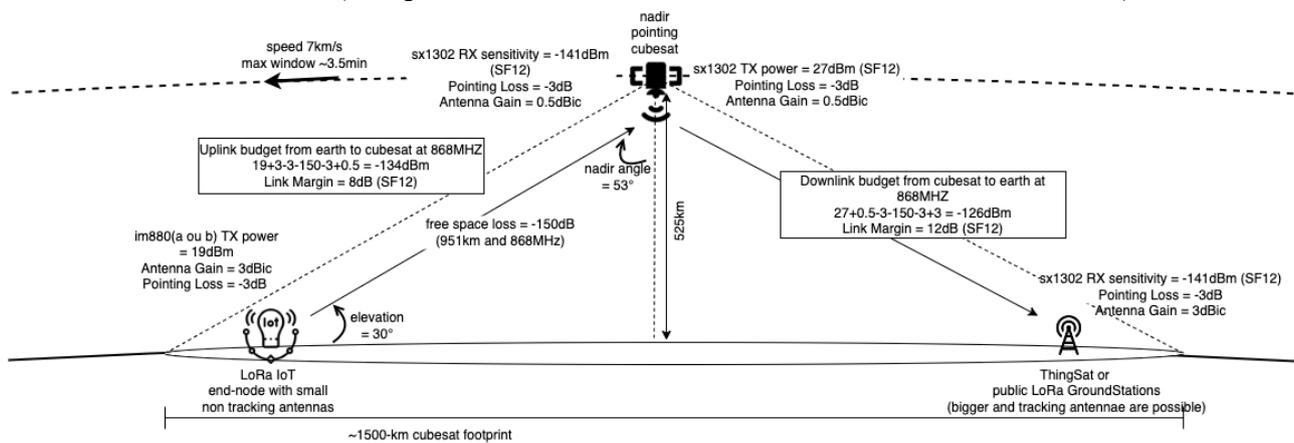


Figure 2. caractéristiques typiques d'un scénario ThingSat

Plusieurs expérimentations ont été prévues dans le logiciel de la carte ThingSat : (i) des **évaluations de la technologie LoRa** sur les liens montant et descendant basées sur l'envoi et la réception de train de paquets à différentes puissances/modulations/fréquences/élévation/... et (ii) des **scénarios applicatifs** comme la réception d'un paquet d'une zone géographique isolée d'Internet puis son transport par le cubesat jusqu'au survol d'une zone avec une station au sol (connectée à Internet) à laquelle le paquet est destinée.

Outre le segment spatial (carte Thingsat + son logiciel + antenne), ces expérimentations nécessitent une architecture au sol composée d'un serveur LoRa que nous opérons pour centraliser les données échangées sur le réseau ThingSat ainsi que le développement de stations au sol (antennes + cartes de communication) compactes, peu coûteuses et faciles à installer afin de pouvoir les distribuer aisément à nos différents partenaires, collègues/radio-amateurs volontaires. Un travail d'interface avec l'architecture du platformiste a été également réalisé afin de récupérer les données de notre charge utile et de pouvoir mettre à jour le logiciel de notre carte.

4. Conclusions et perspectives

La première phase du projet (réalisation carte spatiale/logiciel/antenne + suivi de projet (stagiaires, financement, interaction platformiste,...) + architecture au sol) a été réalisée en un temps record (2 ans) autour d'une équipe resserrée d'enseignants-chercheurs non spécialistes dans tous les domaines requis pour le projet (électronique + spatial). Les différentes réalisations du projet (matériel, logiciel) sont mises à disposition en open-source sur le dépôt git du projet [2].

Pour la suite, les premières expérimentations de communication LoRa commenceront début 2023 avec un réseau de volontaires et de radio-amateurs au sol autour du monde et des opérateurs LoRaWAN privés et public dans plusieurs zones du globe et nous permettront de mieux caractériser la technologie LoRa en environnement spatial.

5. Références

1. LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/>
2. https://gricad-gitlab.univ-grenoble-alpes.fr/thingsat/public/-/blob/master/cubesat_mission/README.md, dépôt git public du projet ThingSat (consulté 14/11/2022)

(3) AMICal Sat : un instrument en orbite

Thierry Sequies ⁽²⁾⁽⁴⁾, *Mathieu Barthelemy* ⁽¹⁾⁽²⁾, *Elisa Robert* ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾, *Vladimir Kalegaev* ⁽³⁾, *Vincent Grennerat* ⁽²⁾⁽⁴⁾, *Guillaume Bourdarot* ⁽¹⁾⁽⁵⁾, *Etienne Le Coarer* ⁽¹⁾⁽²⁾, *Jean-Jacques Correia* ⁽¹⁾, *Patrick Rabou* ⁽¹⁾

(1): Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, F38000 Grenoble, France

(2): Univ. Grenoble Alpes, CSUG, F38000, Grenoble, France

(3): MSU-SINP, Leninskie gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

(4): Univ. Grenoble Alpes, IUT1, F38000 Grenoble, France

(5): Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPHY, 38000 Grenoble, France

(6): SpaceAble, F75009 Paris, France

1. Introduction :

AMICal sat est un nanosatellite, observateur de la météo de l'espace. Il intègre le plus simple des 2 instruments du projet ATISE. Ce dernier concerne le développement d'un spectromètre miniature et une caméra pour localiser les spectres mesurés. AMICal sat a pour ambition de réaliser une démonstration scientifique en orbite de cette caméra sur mesure, dédiée à l'observation des aurores polaires. Pour se faire, Il faut développer l'instrument mais aussi la totalité de la mission spatiale qui l'entourne. On parle ici de concevoir l'ensemble du satellite, le déployer, mais également l'exploiter. L'exploitation nécessite la mise en place de commandes via des communications radio qui permettent aux scientifiques de piloter l'instrument et réceptionner les données. Les observations demandées sont élaborées en prenant en compte les prévisions de flux de particules solaires en interactions avec la magnétosphère.

2. Un instrument dédié à l'observation des aurores polaires en orbite

L'instrument est un appareil photo. Cet appareil répond à deux problématiques majeures qui vont guider la conception. Il s'agit de produire des photos d'aurore polaires depuis l'orbite du satellite, d'une part, et de s'adapter aux contraintes de volume et de l'environnement spatial, d'autre part.

Pour ce qui est de la capacité à produire des photos d'aurores polaires avec un temps de pose réduit, l'appareil, embarqué sur un satellite, se déplace à la vitesse de 28000 km/h à une distance de 100 à 400 km de la scène capturée. Le défilement nécessite un temps de pose qui soit aussi court que possible avec une scène dont le sujet est peu lumineux. Le choix du capteur est donc particulièrement important. Le choix se porte sur un capteur ONYX-Teledyne E2V, 1.3Mpixel. Ce capteur comporte des pixels de 10 µm, ce qui leur procure une bonne sensibilité. La matrice RGB est une matrice RGB dispersée avec 1 pixel sur 16 coloré. Le comportement du capteur est proche d'un capteur monochrome et intègre une information de couleur, extrapolée entre les pixels colorés. Le capteur est livré nu. Il a fallu développer une électronique de conditionnement et de proximité, contenant un FPGA et une mémoire pour effectuer les opérations de lecture et configuration.

Il est à noter que l'image scientifique nécessaire n'a pas besoin d'une très bonne précision géographique. Nous cherchons ici, les intensités des émissions dans des bandes de mêmes longueurs d'onde, ainsi que la position verticale de ces bandes.

En ce qui concerne l'adaptation spatiale de cet instrument, un travail d'ingénierie important est nécessaire. Les contraintes majoritaires sont celles liées au vide, à la thermique, aux rayonnements cosmique et aux vibrations du décollage principalement. Les parties électroniques sont réalisés sur des PCB adaptés pour une tenue au vide et à la dissipation thermique. Des circuits de protection anti latch-up sont introduits dans le design des alimentations. Les composants sont choisis parmi des gammes automobiles pour résister aux vibrations mécaniques. Le blindage est utilisé autant que possible pour résister au rayonnement et permettre une homogénéisation de la chaleur sur la structure. Le choix des matériaux s'impose pour faciliter le transfert de chaleur sur certaines parties ou le limiter à d'autres endroits. Il est proscrit d'utiliser des matériaux qui dégazent dans le vide. Ceux-ci créeraient une pollution, qui se fixerait sur les optiques. Le capteur est un capteur CMOS, réputé pour être moins sensible aux erreurs dues aux particules et rayonnements

cosmiques. Par ailleurs, l'instrument est fortement contraint en volume et en consommation électrique. Le volume disponible est lié au type de satellite choisi pour cette mission. C'est ici un Cubesat 2U (200x100x100mm) qui rend la mission financièrement possible. De nombreux coûts sont liés à l'encombrement du satellite, comme le prix du lancement par exemple. Une partie de ce volume est réservée à la plateforme, qui est la partie du satellite qui sert à faire voler l'instrument : Ordinateur de bord, radio, batteries, conditionnement des alimentations, générateurs solaires, système d'orientation, structure. Le volume restant et les contraintes d'environnement rendent impossible l'utilisation d'un objectif du commerce. Ceux-ci contiennent des polymères, des graisses qui dégazent, des réglages qui sont inutiles et sont trop encombrants. Le savoir-faire des ingénieurs des laboratoires participants a permis le développement de cet objectif adapté. Dans les grandes lignes, c'est un objectif 23mm de focal ouvert à f/1.4. La monture est entièrement métallique et le focus est fixe et non réglable, sauf en usinant une cale.

3. Une mission spatiale complète

Le travail dans ce projet est loin de s'attacher seulement à la réalisation d'un instrument. Il est nécessaire d'intégrer l'instrument dans le satellite. Il est interfacé avec un ordinateur de bord STM32, redondé afin de basculer sur un processeur ou l'autre en cas de défaillance. Un soin particulier est apporté à la connectique haut de gamme Nicomatic car c'est un poste souvent responsable de pannes définitives. L'ensemble est testé en fonctionnement et selon des critères d'environnement strict afin de garantir le fonctionnement du satellite car celui-ci n'est, bien sûr, pas réparable, ni maintenable en vol. Les tests d'environnements sont les tests sous vide, au cyclage thermique et vibration. Le fonctionnement est validé en envoyant des commandes via le lien radio. A l'issue de cette préparation, arrive le moment du lancement. Il a eu lieu le 03 septembre 2020 depuis Kourou sur le vol Véga VV16. Celui-ci a connu de nombreux reports pour des raisons météorologiques, techniques ou sanitaires. La phase d'exploitation se passe en aveugle car nous ne n'avons que les télémétries envoyées par le satellite et pas d'autre moyen de contrôle des mesures. Il nous faut croire les capteurs aveuglement et faire des hypothèses sur le comportement du satellite sans absolue certitude. Les conditions en orbite sont différentes de celles des tests au sol : parasites, variations de puissance, cycles de températures. Il est très difficile de faire varier un seul paramètre et en observer les effets. De plus, les opérations prennent beaucoup de temps car nous voyons le satellite 10 à 20 minutes par jours pour lui envoyer des télécommandes et décharger les données. Cette discontinuité dans le pilotage, a nécessité de réaliser un logiciel de planification pour systématiser les périodes de mesures et de communication en fonction de la prédiction de la position du satellite et de l'activité solaire. Les zones de mesures potentielles évoluent avec les variations de l'activité solaire. Les performances de la communication radio nous obligent à prendre des mesures complémentaires : Nous devons envoyer plusieurs fois les mêmes trames pour être sûr de les recevoir sans parasitage. Il faut décoder la transmission analogique radio en paquets numériques. Enfin, notre logiciel les remet dans l'ordre pour obtenir une image complète. Le satellite a perdu son système d'orientation au bout de 10 jours. La raison reste inconnue. Les images réalisées sont faites avec une orientation hasardeuse. Un traitement interne nous permet de balayer l'histogramme des images afin de redescendre celle qui seraient pertinentes. Pour transformer cet appareil photo en instrument de mesure précis, il faut calibrer le capteur. Le système choisi est basé sur l'émission photométrique de la Lune, bien connue dans certaines conditions d'observation. La perte du système de pointage ne permet pas de faire cette calibration. Au vu des difficultés de traitement et transmission, il est difficile d'exploiter un nombre d'image important sur les 2 dernières années de vol.

4. Conclusion

L'instrument ainsi décrit porté dans l'espace est un projet lourd bien que réalisé sur 3 ans. Ce projet spatial induit un travail administratif conséquent pour lequel nous n'étions pas préparés : autorisations de fréquences radio, demande d'export, assurance, marché public atypique. Les développements techniques sont bien sûr importants mais nous sommes mieux préparés dans notre équipe à affronter des tâches ce type. Le projet est d'ampleur aussi par les partenariats qu'il impose. Les partenaires sont systématiquement internationaux, ne serai ce que pour couvrir les besoins de réceptions radio et les moyens de lancement qui sont mutualisés en Europe ou à l'étranger. Ce

projet est également très formateur pour ce qui est des pratiques spatiales. Il l'est tout autant sur l'obligation de planifier toutes les opérations et exploitations qui vont être faites. Il n'est pas question d'ajouter une commande ou envisager un nouveau paramètre après la finalisation du logiciel de vol. Les mesures sont faites en automatique puisqu'elles sont prévues à l'avance et ce n'est pas courant de passer tout de suite en mode de mesure automatisé avant même d'avoir validé un mode « pas à pas » ou manuel.

La réussite d'une telle mission nous prépare à être plus efficace et gagner en expérience avec des instruments qui sont plus complexes. L'objectif majeur était plutôt dans l'apprentissage des méthodes et phasage du projet plus que dans la réussite scientifique de la mission. L'instrument pour remplir la mission n'était pas optimum mais c'est celui que nous pouvions mener au bout de l'expérimentation.

Références

1. Barthelemy M, Kalegaev V, Vialatte A, Le Coarer E, Kerstel E, et al.
2018. AMICal Sat and ATISE: two space missions for auroral monitoring.
J. Space Weather Space Clim. 8, A44.
2. Vialatte, A.; Barthelemy, M.; Liliensten, J.; Impact of Energetic Electron
Precipitation on the Upper Atmosphere: Nitric Monoxide; The Open
Atmospheric Science Journal, vol. 11, issue 1, pp. 88-104; 2017.
3. Le Coarer et al. ;Optimization of a compact static interferometer based
on ImSPOC technology for a wide field polar lights monitoring; ICSO 2021.
4. Barthelemy M, Robert E, Kalegaev V, Grennerat V, Sequies T, Bourdarot G, Le Coarer E,
Correia, Rabou P et al. ; 2022. AMICal Sat: A sparse RGB imager on board a 2U
cubesat to study the aurora. JMASS 2022

(4) QlevEr Sat : charge utile avec IA embarquée pour observer la Terre

*Tania McNamara, Mathieu Barthélémy, Jean-Louis Monin, Lian Apostol, Thierry Séquière⁽¹⁾,
Alexis Noé, Jocelyn Chanussot⁽²⁾*

(1) CSUG Université Grenoble Alpes

tania.mcnamara@univ-grenoble-alpes.fr ; mathieu.barthelemy@univ-grenoble-alpes.fr ; jean-louis.monin@univ-grenoble-alpes.fr ;
lian.apostol@univ-grenoble-alpes.fr ; thierry.sequiere@univ-grenoble-alpes.fr ;

(2) MIAI Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, CNRS
alexis.noe@grenoble-inp.fr ; jocelyn.chanussot@grenoble-inp.fr

Glossaire

| | |
|--------|--|
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CSUG | Centre Spatial Universitaire de Grenoble |
| DMIPS | Dhrystone Million Instructions per Second |
| EO | Earth Observation |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |
| GFLOPS | Giga Floating Point Operations Per Second |
| IA | Intelligence Artificielle |
| MIAI | Multidisciplinary Institute of Artificial Intelligence |
| MFT | Micro 4/3 |
| RGB | Red Green Blue |
| U | Unité standard des CubeSats [1] (10cm x 10cm x 10cm) |
| UFO | Emerging indUstries new value chains boosted by small Flying Objects (H2020) |

1. Introduction

Le projet QlevEr Sat piloté par le Centre Spatial Universitaire de Grenoble (CSUG) a pour but d'embarquer de l'Intelligence Artificielle (IA) à bord d'un CubeSat [1] de démonstration destiné à l'Observation de la Terre (EO).

Avec l'augmentation du nombre de satellites et la saturation des fréquences radio en orbite basse, une IA embarquée directement à bord permettra de réduire drastiquement la bande passante nécessaire aux transmissions de données. Le défi consiste à interfacer un processeur robuste et résistant aux radiations avec un imageur performant dans un petit volume tenant dans un nanosatellite 6U (soit 6 litres), afin d'acquérir - puis directement analyser - des images d'une résolution de 5m permettant d'observer les évolutions d'une zone terrestre donnée.

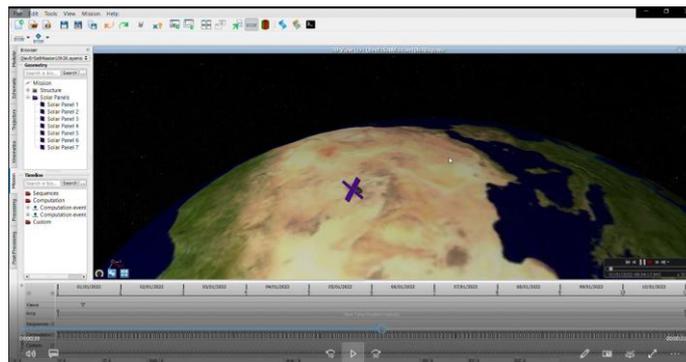


Figure 1. Simulation du CubeSat 6U QlevEr Sat en orbite

QlevEr Sat observera la Terre en lumière visible et côté jour uniquement, depuis une orbite basse héliosynchrone, et la durée de revisite sera de l'ordre de la semaine (5 à 15 jours), afin de pouvoir observer des changements de paysages significatifs.

Une orbite basse se situe aux alentours de 500km d'altitude. Une orbite héliosynchrone passe par les pôles, ce qui permet d'une part de balayer une plus grande surface du globe, et d'autre part de conserver la même heure solaire locale en un point donné, autrement dit le même jeu d'ombres entre deux passages.

2. Conception préliminaire de l'instrument

Le premier modèle préliminaire de l'instrument QlevEr Sat du CSUG est un « breadboard » constitué

- d'un objectif catadioptrique de focale 300mm, avec une monture MFT usinée sur mesure,
- d'une carte électronique de proximité avec le capteur CMOS Emerald 16M fourni par le partenaire Teledyne e2v,
- d'un bridge FPGA pour convertir le flux pixels en frames
- et du processeur 4-cœurs ARM Qormino de Teledyne e2v – sur son kit d'évaluation – chargé d'exécuter l'algorithme IA de traitement des images (Cf. Figure 2).



Figure 2. Premier modèle « breadboard » de l'instrument du CSUG

D'où le nom "QlevEr" avec un Q majuscule pour Qormino et un E majuscule pour Emerald.

Un objectif catadioptrique reprend le même principe de miroirs que dans un télescope de type Cassegrain, en plus des lentilles, ce qui en fait un objet plus compact pour une même longueur focale.

Pour chaque région d'intérêt ciblée, Emerald va acquérir une série d'images couleurs de 16 mégapixels, à une cadence d'une frame toutes les deux secondes, jusqu'à 30 images pour couvrir une bande de plus de 400km. Les données images sont alors transférées du bridge FPGA à Qormino avant d'être traitées par un algorithme entraîné à la classification de pixels spécifiquement conçu pour l'embarqué par une équipe du MIAI, autre partenaire du projet.

3. IA embarquée ou « Edge AI »

L'avènement des satellites miniaturisés associés au NewSpace, et la réduction des coûts de développement et de lancement que cette nouvelle économie engendre, ouvre de nouvelles perspectives, notamment s'agissant des missions d'observation de la Terre [2]. L'IA, quant à elle, a démontré qu'elle pouvait produire des résultats remarquables en traitement automatique des images, mais cette technologie en plein essor, gourmande en énergie, reste essentiellement déployée au sol [3]. L'IA embarquée ou « Edge AI » en altitude ou en orbite représente alors d'importants débouchés pour de nombreux marchés comme l'agriculture, les assurances, la défense, l'urbanisme, la gestion du patrimoine, l'environnement...

Le module Qormino n'est certes pas aussi puissant que d'autres solutions dimensionnées pour effectuer des inférences dans des applications IA au sol, mais présente un meilleur ratio GFLOPS/Watt, ce qui le rend plus compatible avec les systèmes spatiaux à la consommation contrainte (par les panneaux solaires, les batteries et l'environnement thermique) [4]. Avec ses 4 cœurs et ses 30000 DMIPS, il s'avère en outre plus puissant que d'autres CPU du marché spatial [5].

L'IA conçue spécifiquement pour QlevEr Sat par l'équipe du MIAI a tout d'abord été développée et testée en Python, puis migrée en C++ pour gagner en efficacité.

L'algorithme doit être entraîné au préalable pour détecter des textures particulières telles que la forêt ou les nuages (ou d'autres textures). L'intérêt de cette étape est qu'il n'y a pas besoin de définir ce qu'est telle ou telle texture par de la logique classique, c'est l'algorithme qui va lui-même construire son modèle en paramétrant son propre réseau interne. L'étape dite inférence va alors générer des cartes binaires Forêt/non-Forêt en noir et blanc, ou alternativement, des cartes binaires Nuages/non-Nuages (par exemple). En effet, QlevEr Sat a retenu comme cas d'usages pilotes,

l'étude de la déforestation qui est un cas d'usage concret à fort enjeu sociétal lié au climat et à la biodiversité, ainsi que la détection des nuages qui est un cas d'usage générique qui concerne toute mission spatiale d'EO opérant dans le visible. D'autres usages scientifiques, industriels, militaires ou citoyens peuvent donc s'envisager, le fichier de paramètres du réseau étant un relativement petit fichier (<1Mo).

Pour ces deux cas pilotes, l'entraînement a été effectué sur un dataset Copernicus Sentinel-2 en format RGB, mais l'algorithme sait correctement analyser les images Emerald en format Raw-Bayer.

Le format Raw-Bayer est un format d'images couleurs très utilisé en imagerie, constitué, pour chaque groupe de quatre pixels, de deux pixels verts, d'un rouge et d'un bleu, au lieu de trois couleurs par pixel, ce qui en fait un format trois fois plus léger que le format RGB. Et c'est par des techniques d'extrapolation des couleurs plus ou moins élaborées (dématriçage) que l'image finale est ensuite reconstituée, sans en altérer le rendu visuel général, comme c'est souvent le cas dans nos téléphones portables.

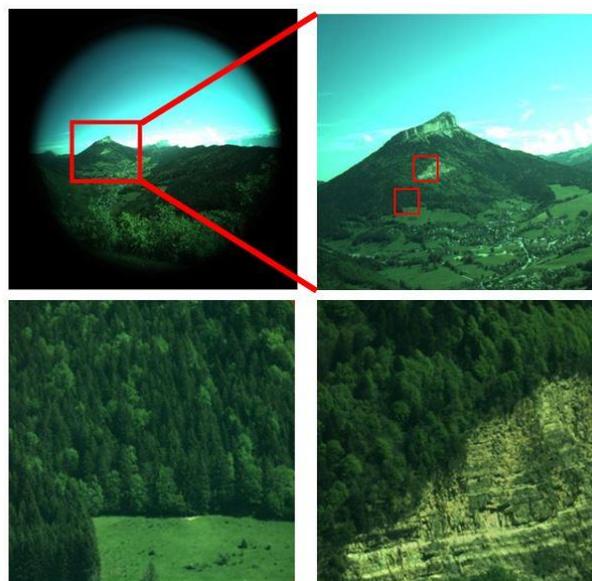
4. Datasets de test et résultats

En IA, il faut distinguer le dataset d'entraînement, qui est le jeu de données servant à l'apprentissage par le réseau de neurones (Machine Learning), du dataset de test, qui est le jeu de données servant aux étapes de validation.

Afin de tester suffisamment la robustesse du système IA de QlevEr Sat, ce sont quatre datasets de test, plutôt qu'un seul, qui ont été élaborés :

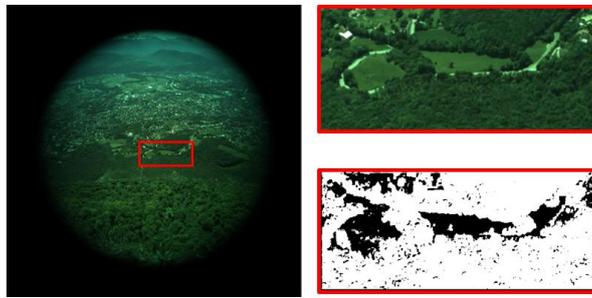
- 1) un dataset Emerald local avec optique similaire
- 2) un dataset Emerald local avec résolution similaire
- 3) un dataset satellitaire similaire au dataset d'entraînement
- 4) un dataset Emerald satellitaire simulé.

Les deux premiers ont été constitués à partir d'images de forêts distantes prises par des équipes du projet dans les montagnes de la région grenobloise, certaines avec une optique similaire à celle du satellite (comme l'objectif de l'instrument préliminaire en Figure 2), d'autres avec une résolution spatiale similaire à celle du satellite (à l'aide d'une mini-lentille grand-angle).



© CSUG

Figure 3. Différence entre la mini-lentille grand angle à petite focale (en haut à gauche) et le téléobjectif 300mm (en bas) depuis le même point de vue



© CSUG

Figure 4. Scène distante locale prise avec Emerald et la mini-lentille grand angle à petite focale (à gauche) et carte binaire Forêt/non-Forêt correspondante générée par IA pour la zone sélectionnée (à droite)

Le dataset de test satellitaire provient, comme pour celui de l’entraînement, d’images Sentinel-2.

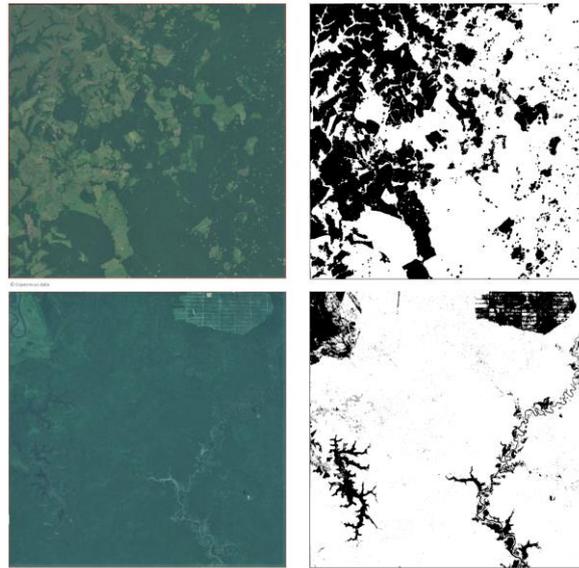


Figure 5. Images satellitaires Copernicus Sentinel-2 (à gauche) et cartes binaires Forêt/non-Forêt correspondantes générées par IA (à droite)

| Dataset | Sentinel-2 | Emerald |
|------------------|-------------|---------------|
| Environnement | Spatial | Montagnes |
| Distance | 786km | Max 25km |
| Végétation | Tropicale | Alpine |
| Angle | Nadir | Inclinaisons |
| Spectre | 12 bandes | 3 (R G B) |
| Filtre IR-cut | Non | Oui |
| Niveau de signal | Selon scène | Tests manuels |
| Format | RGB | Raw-Bayer |
| Encodage | 16b | 8b |
| Plage de valeurs | Spécifique | Variable |
| Prétraitement | L1C [6] | Raw, no WB* |
| Effet notoire | Atmosphère | Vignettage |
| Nuance dominante | Bleu | Vert |

* WB: Balance des blancs

Table 1. Principales différences entre les datasets Sentinel-2 et Emerald

Un simulateur de dataset Emerald *spatial* plus représentatif pour QlevEr Sat a ensuite été développé dans Matlab pour générer des images d’une qualité dégradée, censée être plus réaliste – plus “brute” et plus “éméraldisée” – que celle des images prétraitées au niveau L1C [6] issues de la base de données publique Copernicus. Le traitement IA de QlevEr Sat a ainsi pu être testé massivement avec un dataset Emerald, quasiment comme s’il venait de l’Espace.

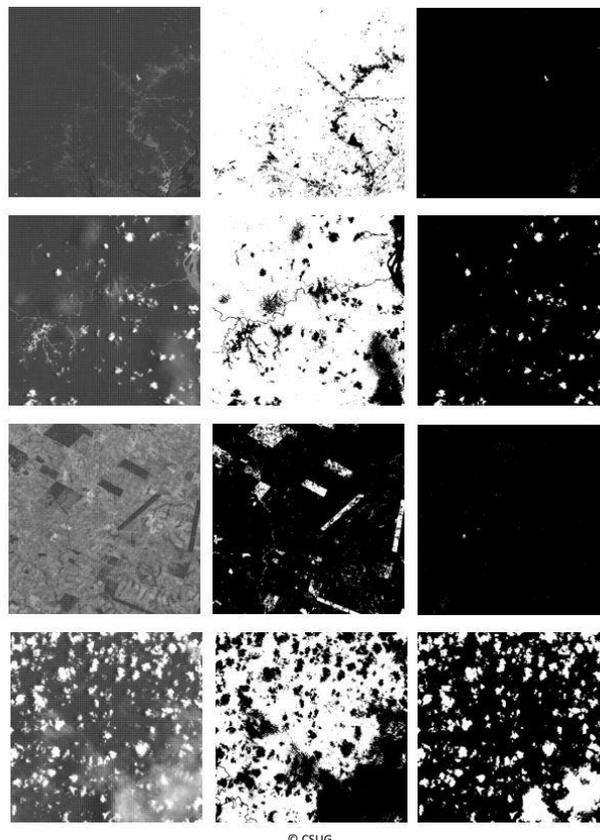


Figure 6. Série d'images couleurs satellitaires Emerald 16M générées en format Emerald Raw-Bayer 8b (à gauche) avec inférence Forêt correspondante (au centre) puis inférence Nuages (à droite)

| Image | RGB | Raw | Forest map | Clouds map |
|---------|-------|-------|------------|------------|
| Image 1 | 49155 | 16385 | 328 | 87 |
| Image 2 | 49155 | 16385 | 518 | 164 |
| Image 3 | 49155 | 16385 | 347 | 88 |
| Image 4 | 49155 | 16385 | 658 | 436 |

Average compression factor vs raw = 50

Table 2. Comparaison des tailles de fichier entre images brutes avant IA et cartes binaires compressées sans perte correspondantes après IA (en octets)

Dans chacun des cas, les résultats ont montré que l'IA était capable de produire des contours d'une très grande précision, dans des conditions très différentes, cartographie qui à la main prendrait des jours à un humain, tout en réduisant les fichiers en moyenne d'un facteur 50.

5. Conclusions et perspectives

L'avantage de telles cartes produites directement à bord est qu'elles sont non seulement bien plus légères que leur version originale, mais aussi semi-interprétées avec plus d'information cognitive.

Autrement dit, elles sont plus faciles à compresser, plus faciles à redescendre, plus faciles à stocker, plus faciles à transférer, plus faciles à analyser (calculs de surface, couvertures proportionnelles, évolution temporelle, traitements croisés), ce qui est utile et économique pour monitorer la déforestation ou d'autres cas de détection de changement. En effet, tout ce que l'algorithme est capable de faire pour Forêt/non-Forêt fonctionne aussi pour Nuages/non-Nuages... à condition que le réseau de neurones ait été entraîné au préalable sur un dataset dédié.

Potentiellement, on peut lui apprendre à détecter n'importe quelle texture, ce qui laisse entrevoir d'autres applications (sable, glace ou autre...). Que ce soit pour diverses charges utiles spécialisées, ou pour une charge utile tout-en-un polyvalente. Ou une constellation.

Là est la plus-value de ce type d'équipement par rapport aux dispositifs de traitement d'images plus classiques.

Le CSUG recherche à présent de nouvelles alliances pour continuer à démontrer les possibilités de l'IA embarquée en orbite basse.



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 873411-UFO



6. Références

1. The CubeSat Program, Cal Poly SLO. "CubeSat Design Specification", 2022. <https://www.cubesat.org/cubesatinfo> (accessed 12.01.23).
2. M. N. Sweeting, "Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space," in Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 3, pp. 343-361, March 2018.
3. Y. Li, H. Zhang, X. Xue, Y. Jiang, Q. Shen. "Deep learning for remote sensing image classification: A survey." in WIREs Data Mining Knowledge Discovery, May 2018. DOI:10.1002/widm.1264.
4. Vandame, P., Noé, A., Čech, J., Apostol, L., Prieur, C., McNamara, K., Martin, F., Sequiès, T., McNamara, T., Barthélémy, M., Chanussot, J. (2022). Assessing the potential of Qormino processor for embedded AI on board a CubeSat. The IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems (J-MASS). September 2022, Vol.3, Issue 3, pages 121-128. ISSN 2576-3164. DOI: 10.1109/JMASS.2022.3202438.
5. G. Lentaris & al. High-Performance Embedded Computing in Space: Evaluation of Platforms for Vision-Based Navigation, in Journal of Aerospace Information Systems, vol. 15, no. 4, pp. 1-49, 2018, doi:10.2514/1.I010555.
6. ESA, Sentinel Online, Level-1C <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-1c> (accessed 13.11.22).

(5) CARACTERISATION DE L'HOMOGENEITE DES COUCHES MINCES TRANSPARENTES A L'AIDE D'ELLIPSOMETRIE EN REFLEXION ET EN TRANSMISSION POUR LES APPLICATIONS OPTIQUES ET MECANIQUES

Océane Guillot, Amira Guediche, Mathieu Lafarie, Amandine Moïny, Théo Brockhouse et Hervé Piombini

CEA, DAM Le Ripault, F-37260 Monts, France

7. herve.piombini@cea.fr

RÉSUMÉ

Le CEA/DAM continue à construire le laser Mégajoule dont le principal coût de maintenance est le changement des optiques endommagées par flux laser généré par cette installation. L'endommagement laser est principalement dû à la création d'une onde de choc qu'on entend lorsque l'endommagement se produit. Pour réduire l'endommagement laser, on se propose d'atténuer cette onde de choc par l'ajout d'une couche élastique transparente à 3 ω c'est à dire à 355 nm entre le substrat et la couche antireflet. L'épaisseur de cette couche n'est encore clairement définie mais on pense qu'elle devra être supérieure au micromètre donc nettement plus épaisse que les épaisseurs des couches antireflets que nous élaborons pour réaliser les antireflets des optiques du LMJ. Comme les couches seront élaborées par technique sol-gel. L'épaisseur de la couche antichoc nécessite plusieurs dépôts faits en multi-passage. Le problème principal de ces couches épaisses est l'hétérogénéité d'épaisseur produite à chaque passage qui va amplifier les défauts d'épaisseur de la couche finale et donc entraîner des modifications de la surface d'onde ou des micro-pentes locales. Pour évaluer l'importance de ce défaut d'épaisseur, nous avons développé un "ellipsomètre" à 633 nm qui permet de faire des cartographies. Lors de ce congrès on décrira théoriquement le phénomène évoqué et l'ellipsomètre que nous avons développé et on donnera les premiers résultats.

MOTS-CLEFS : *sol-gel, couche antichocs, ellipsomètre*

INTRODUCTION

Le CEA/Le Ripault travaille sur les traitements de nombreux composants optiques du Laser MegaJoule (LMJ) utilisés en transmission. En particulier, il a développé tous les procédés de fabrication des revêtements antireflets réalisés par sol-gel. Malgré la qualité des traitements actuels, des dommages se produisent lors des tirs du LMJ parfois liés soit au faisceau laser, soit au matériau du composant optique, soit au film déposé sur le substrat. Ces dommages initialement très petits par rapport à la taille du composant optique (40X40 cm²) peuvent croître avec la fluence laser. Cette croissance est exponentielle et rend à terme l'optique inutilisable en raison de sa perte en transmission. Pour augmenter la durée de vie de ces optiques, on souhaite atténuer les ondes de choc générées par des micro-absorptions. Ces ondes de chocs sont responsables des endommagements lasers et induisent les défauts sur les faces arrière des optiques. Une atténuation mécanique des ondes de chocs peut être obtenue avec un film "mince" ayant des propriétés élastiques et une bonne compatibilité avec la fluence laser élevée du LMJ et la silice colloïdale qui sert actuellement de film antireflet. Ce film peut être épais pour une couche mince et atteindre quelques microns. Il doit aussi conserver la bonne qualité de surface d'onde. Ces distorsions d'onde sont liées à l'homogénéité du film qui va être mesurée avec un ellipsomètre à 633 nm équipé de platines motorisée permettant de faire une cartographie du composant.

VARIATION DE LA PHASE EN TRANSMISSION AVEC L'HOMOGENEITE D'ÉPAISSEUR ET BANC EXPERIMENTAL

En se basant sur les miroirs spécifications du M1 ($\pm 0.1 \mu\text{rad}$ en PV et $0.3 \mu\text{rad}$ en RMS) et sachant que les pentes sont conservatives le long du chemin optique, on peut estimer l'hétérogénéité d'épaisseur Δe nécessaire. On sait que les variations d'épaisseur dépendent des procédés de dépôts et sont généralement homothétique de l'épaisseur déposée. Elles correspondent à une variation de la longueur d'onde (souvent appeler longueur d'onde de centrage) et on peut calculer facilement la variation de la phase d'un empilement

produit par une hétérogénéité et par conséquent son gradient $\frac{d\phi_T}{d\lambda} = a \frac{d\phi_T}{d\lambda}$. Pour une couche de 2000 nm de silice colloïdale, la variation de phase est d'environ 10 fois plus grand que la variation de phase d'une couche de 200 nm (Fig.1).

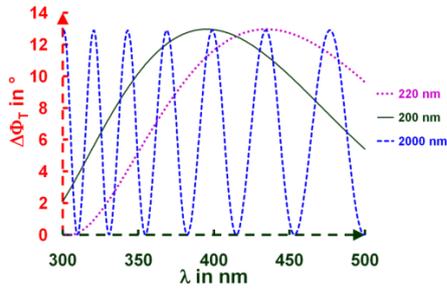


Fig. 1: Variation de la phase en transmission en fonction de la longueur d'onde selon trois épaisseurs de couches (200, 220 et 2000 nm) de silice colloïdale ayant un coefficient d'extinction de 10^{-4} .

D'après la Fig.1 on constate un déphasage de l'ordre de 3° à 375 nm pour une couche de 200 nm qui a une homogénéité d'épaisseur de 10 % et que les variations de phase de la couche ayant 2000 nm sont environ 10 fois plus rapides entraînant des variations de pentes sur le composant 10 fois plus forte à hétérogénéité constante.

Un banc expérimental Fig. 2 est un ellipsomètre mono-longueur d'onde à 633 nm qui dispose d'un support échantillon motorisé en x et y pour effectuer des cartographies et mesurer ainsi les homogénéités de couches sol-gel développées. Il a été monté et sera le sujet de la présentation.

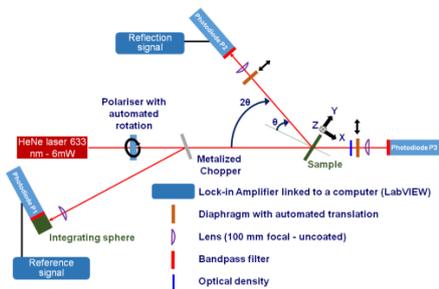


Fig. 2: Schéma de notre ellipsomètre

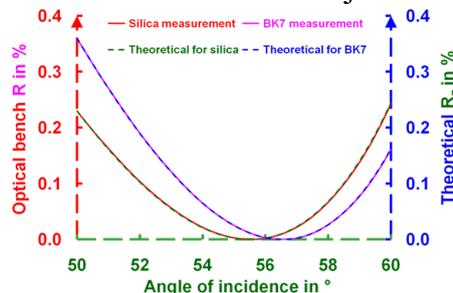


Fig. 3: Résultat de mesure sur un substrat de silice et un substrat de BK7

La Fig. 3 illustre un 1^{er} résultat obtenu sur un substrat de silice et sur un substrat de BK7. Les minimums des courbes correspondant à l'incidence de Brewster i_B donnent l'indice des substrats se silice $n = 1.4566$ et de BK7 $n = 1.5131$

CONCLUSION

Un ellipsomètre mono-longueur d'onde a été monté. Il permet de déterminer l'indice des matériaux et les épaisseurs des couches. Il réalise aussi des cartographies.

REFERENCES

[1] Piombini, Hervé "Estimation of phase shifts linked only to the coating for a dielectric mirror" APPLIED OPTICS Volume: 50, Issue: 9 Pages: C441-C448 (2011)

(6) Mesure par interférométrie à faible cohérence de la dépendance en longueur d'onde du coefficient de réflexion complexe d'un traitement antireflets

M. Lequime, I. Khan, M. Zerrad, C. Amra

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

1. Introduction

Les traitements anti-reflets constituent très certainement la fonction d'usage la plus répandue dans le domaine des couches minces optiques. A côté d'applications grand public, comme la lunetterie ou la photographie, qui privilégient des coefficients de réflexion de l'ordre du pour cent ou de la fraction de pour cent sur l'ensemble du domaine visible, se rencontrent également des applications en milieu industriel (lasers de puissance) ou dans le domaine de la recherche académique (détection des ondes gravitationnelles), où les valeurs recherchées sont beaucoup plus faibles (entre quelques centaines de ppm et le ppm), mais uniquement pour certaines longueurs d'onde bien spécifiques, correspondant notamment à des émissions de sources lasers (1064 nm, par exemple).

Dans cette communication, nous décrivons le montage que nous avons récemment développé dans le but de réaliser la mesure, en amplitude et phase, de la dépendance spectrale du coefficient de réflexion d'une interface traitée antireflets, et nous présenterons les résultats que nous avons obtenus de manière expérimentale sur un composant test à la longueur d'onde de 1055 nm.

2. Description du montage expérimental

Le montage expérimental que nous avons développé [1] est désigné par l'acronyme BARRITON (pour *Back-scattering And Retro-Reflection by Interferometry with lOw coherence*) et est représenté de manière schématique à la Figure 1.

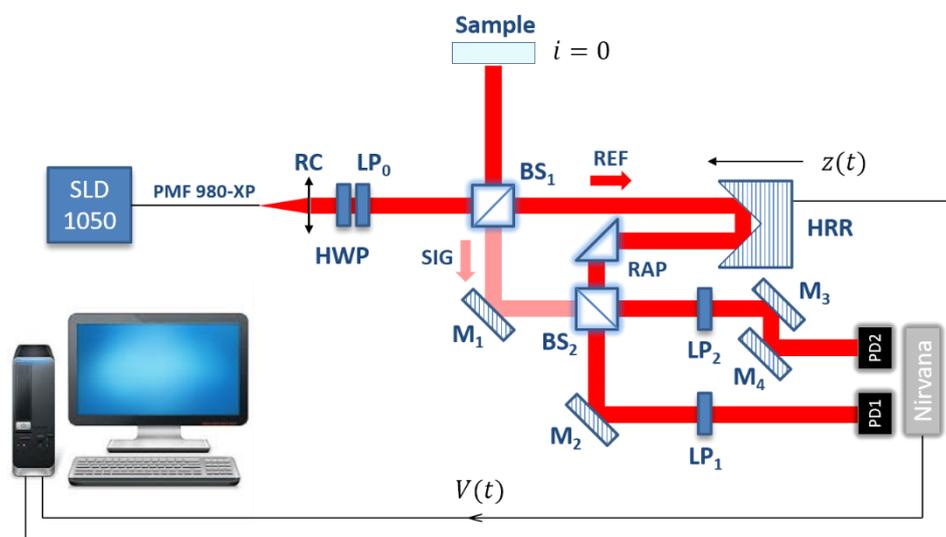


Figure 1. Schéma du banc BARRITON

Le flux lumineux de polarisation linéaire fourni par une diode superluminescente centrée autour de 1050 nm est couplé dans une fibre monomode à maintien de polarisation PM980-XP, dont l'extrémité est placée au foyer d'un miroir parabolique hors axe RC de 7 mm de focale. Le faisceau gaussien de faible divergence ainsi obtenu traverse une lame demi-onde simple ordre HWP, dont la position angulaire permet de modifier l'orientation de la direction de polarisation de ce faisceau par rapport à celle d'un polariseur linéaire fixe LP₀. Cette association HWP/LP₀ permet, en jouant sur le courant d'alimentation de la diode superluminescente, d'ajuster indépendamment la puissance utile du faisceau lumineux et son spectre d'émission (longueur d'onde centrale et largeur de raie), tout en conservant une orientation fixe (TE ou TM) à son état de polarisation linéaire.

Ce faisceau lumineux polarisé est divisé en deux sous-faisceaux par un cube séparateur non polarisant BS₁. La partie réfléchi par le cube est envoyée vers l'échantillon à caractériser et le flux lumineux rétro-réfléchi par cet échantillon est transmis par le même cube séparateur et constitue la

voie Signal (SIG). La partie transmise par BS₁ forme la voie de référence (REF). Celle-ci est rétro-réfléchi par un coin de cube creux HRR qui la décale en outre latéralement par rapport à la direction incidente. Ces deux voies sont ensuite recombinaées au travers d'un second cube séparateur non polarisant BS₂ et les deux sorties complémentaires de ce mélangeur cohérent sont adressées vers les deux photodiodes (PD₁ et PD₂) d'une détection balancée [2].

Le principe de la mesure est le suivant : on insère en auto-collimation dans le montage un échantillon constitué d'une lame à faces planes et parallèles dont l'une des faces est traitée anti-reflets. On numérise alors le courant délivré par la détection balancée lors d'un déplacement du coin de cube réalisé à vitesse constante au voisinage de la différence de marche nulle de l'interféromètre. L'interférogramme ainsi obtenu fait apparaître deux échos [1], chacun de ces échos étant associé à la rétro-réflexion sur l'une des interfaces de l'échantillon. Un traitement numérique par transformation de Fourier discrète (DFT) donne directement accès à la dépendance en longueur d'onde de la densité spectrale de puissance de chacun des deux flux réfléchis. En utilisant la face non traitée comme voie de calibration, on obtient au final la dépendance spectrale du coefficient de rétro-réflexion de l'interface traitée, tandis que la phase de la DFT renseigne sur celle du déphasage à la réflexion sur cette même interface.

3. Résultats expérimentaux

La Figure 2 présente les résultats des mesures réalisées sur un échantillon test.

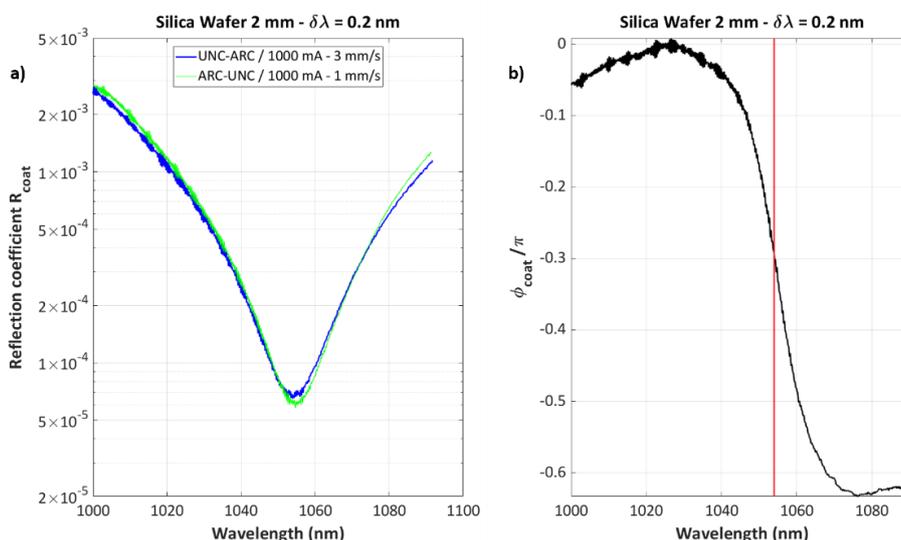


Figure 2. Résultats expérimentaux obtenus sur un échantillon test (lame de silice de 2 mm d'épaisseur dont l'une des faces est traitée antireflets @ 1055 nm) [a] dépendance spectrale du coefficient de rétro-réflexion pour deux conditions expérimentales différentes – b) dépendance spectrale du déphasage à la réflexion sur l'interface traitée]

Le plancher de détection de notre méthode de mesure est de l'ordre de 0,1 ppm, pour une résolution spectrale de 0,2 nm. Le temps nécessaire à la réalisation d'une mesure est de quelques secondes. Le principe de cette méthode peut être adapté à la mesure de la dépendance spectrale des coefficients de rétrodiffusion des deux interfaces (traitée et non traitée) [1].

Ce travail a été réalisé dans le cadre du groupe de recherche sur la lumière parasite du Consortium LISA. Les auteurs tiennent également à remercier le programme de gestion des talents AMidex de l'Université d'Aix Marseille et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour leur soutien financier.

4. Références

1. I. KHAN, M. LEQUIME, M. ZERRAD, and C. AMRA, "Detection of Ultralow Light Power Back-Reflected or Back-Scattered by Optical Components Using Balanced Low-Coherence Interferometry," *Phys. Rev. Applied* **16**, 044055 (2021)
2. P. C. D. HOBBS, "Ultrasensitive laser measurements without tears," *Appl. Opt.* **36**, 903-920 (1997)

(7) Métrologie d'absorption des composants optiques en couches minces interférentielles pour les lasers de forte puissance continue

Camille PETITE⁽¹⁾, Mathias SOULIER^{(1) (2)}, Jeanne GRAISSET⁽¹⁾, Antonin MOREAU⁽¹⁾, Hélène KROL⁽²⁾, Julien LUMEAU⁽¹⁾, et Laurent GALLAIS⁽¹⁾

(1) Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, UMR 7249,
52 Av. Escadrille Normandie Niemen, 13013 Marseille

(2) CILAS Établissement de Marseille,
600 avenue de la Roche Fourcade, Pole ALPHA Sud - Saint Mitre, 13400 Aubagne – France

1. Introduction

Les lasers de forte puissance continue sont utilisés dans une grande variété d'applications allant du militaire à l'usinage en passant par les communications laser par satellite. Ces lasers ont connu une augmentation rapide de leur puissance au cours des dernières années et peuvent maintenant atteindre quelques centaines de kilowatts [1]. Les composants optiques utilisés dans et avec ces lasers doivent pouvoir tenir cette puissance et cette tenue dépend en partie de leur absorption. Il est alors nécessaire de développer des outils métrologiques pouvant mesurer ces absorptions jusqu'à une partie par million (ppm). En conséquence, diverses méthodes de mesure ont été développées pour évaluer l'absorption en dessous de ppm [2–5]. Nous avons étudié ici la « Lock-In Thermography » (LIT) [6–8].

2. Montage expérimental

Le principe de la thermographie active consiste à chauffer par laser un échantillon dont l'absorption est inconnue afin d'en détecter le rayonnement thermique. La température atteinte est directement liée à l'absorption. Contrairement à la thermographie active, la LIT utilise un faisceau laser modulé pour obtenir une réponse thermique modulée à la même fréquence. Cette technique permet de séparer la variation de température dans l'échantillon des autres contributions thermiques ou de bruit non modulé par un filtrage dans l'espace de Fourier. Ainsi, la LIT a une très faible sensibilité aux bruits thermiques et biais environnementaux.

Comme ces méthodes sont utilisées pour mesurer une très faible absorption, seules quelques ppm de la puissance du laser sont utiles pour générer les effets thermiques. Cela signifie qu'une grande partie de la puissance du laser est inutilisée. Le banc optique que nous avons développé consiste à recycler le faisceau laser sur l'échantillon. Ce montage, dit multipassage, est présenté sur la Figure 1.

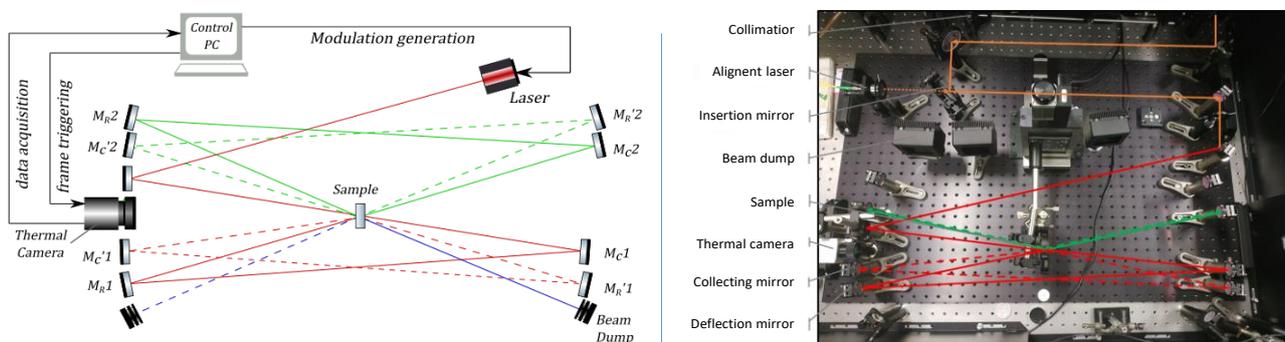


Figure 1. LIT multipassage. À gauche, schémas de principe [8]. Les faisceaux réfléchis et transmis à chaque passage dans l'échantillon sont récupérés puis redirigés vers ce dernier afin de multiplier la puissance qui y est déposée. À droite, une des réalisations de ce montage.

La caméra ne fournissant que des données relatives, une procédure d'étalonnage est nécessaire. Nous avons utilisé l'approche basée sur des échantillons de référence avec une

absorption élevée (1,9, 2,4, 3,2 et 4%) déterminée par spectrophotométrie (la diffusion est supposée être négligeable). Des mesures LIT en fonction de la puissance absorbée permettent d'obtenir la courbe d'étalonnage du banc. Ainsi avec la connaissance de la puissance laser au moment de la mesure, nous pouvons déterminer l'absorption de n'importe quel échantillon ayant les mêmes propriétés thermiques. L'incertitude de mesure a également été évaluée. Le bilan en considère 3 origines principales : l'incertitude du signal principalement due à la répétabilité et au traitement du signal, l'incertitude sur la puissance du laser principalement due à la stabilité de la puissance et l'incertitude de calibration due aux deux causes précédentes et à la détermination de l'absorption des échantillons de référence. Par propagation de ces incertitudes, on trouve une incertitude sur l'absorption de 12%.

3. Mesures

L'absorption maximale mesurée pour tous les échantillons mesurés (HfO_2 , Ta_2O_5 , TiO_2 , Nb_2O_5 et SiO_2 à 300 et 600 nm d'épaisseur) ne dépasse pas ~30 ppm. Cela correspond aux résultats rapportés dans la littérature pour des dépôts par évaporation et est confirmé par le fabricant de la machine.

Afin de vérifier la fiabilité de ces mesures, nous avons procédé à une comparaison inter-laboratoires sur des couches demi-onde à 1070 nm de Nb_2O_5 avec d'autres méthodes de mesure utilisées dans d'autres laboratoires. Ces mesures sont comprises entre 11 et 21 ppm, mais restent globalement cohérentes compte tenu de la variation d'absorption constatée dans un même dépôt et des incertitudes de mesures respectives.

L'utilisation d'un faisceau large et d'une caméra d'imagerie thermique rend la technique LIT intéressante pour réaliser la cartographie d'absorption. Dans ce but, nous avons réalisé une configuration dédiée. En utilisant un faisceau *top hat* de 3 cm de diamètre et une puissance laser de 1 kW, nous avons pu fournir une carte d'absorption pour une monocouche de HfO_2 de 300 nm d'épaisseur. Cette carte est limitée à une résolution millimétrique et est relative (non étalonnée). Mais elle est réalisée en une seule mesure de moins de dix minutes. Ceci montre l'intérêt de la technique pour fournir une cartographie rapide pour l'inspection des macro-défauts absorbants dans les composants optiques en couches minces.

4. Références

1. E. A. Shcherbakov, V. V. Fomin, A. A. Abramov, A. A. Ferin, D. V. Mochalov, and V. P. Gapontsev, "Industrial grade 100 kW power CW fiber laser," in *Advanced Solid-State Lasers Congress* (OSA, 2013), p. ATh4A.2.
2. M. Commandré and E. Pelletier, "Measurements of absorption losses in TiO_2 films by a collinear photothermal deflection technique," *Appl. Opt.* **29**, 4276 (1990).
3. A. During, C. Fossati, and M. Commandré, "Multiwavelength imaging of defects in ultraviolet optical materials," *Appl. Opt.* **41**, 3118 (2002).
4. D. Franta, I. Ohlídal, D. Nečas, F. Vižd'a, O. Caha, M. Hasoň, and P. Pokorný, "Optical characterization of HfO_2 thin films," *Thin Solid Films* **519**, 6085–6091 (2011).
5. D. Ristau and J. Ebert, "Development of a thermographic laser calorimeter," *Appl. Opt.* **25**, 4571 (1986).
6. O. Breitenstein, W. Warta, and M. Langenkamp, *Lock-in Thermography*, Springer Series in Advanced Microelectronics (Springer Berlin Heidelberg, 2010), Vol. 10.
7. F. Liu and L. Gallais, "Absorption measurements in optical coatings by lock-in thermography," *Appl. Opt.* **56**, 9225 (2017).
8. C. Petite, R. Marcouillé, A. Moreau, H. Krol, C. Grèzes-Besset, J. Lumeau, and L. Gallais, "Multipass lock-in thermography for the study of optical coating absorption," *Appl. Opt.* **61**, 978 (2022).

(8) Imagerie holographique numérique multi-vues de champs acoustiques

Saucene Hassad^(1,2), Kouider Ferria⁽²⁾, Larbi Bouamama⁽²⁾, Pascal Picart⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut d'Acoustique - Graduate School (IA-GS), CNRS, Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS, France

(2) Laboratoire d'Optique Appliquée, IOMP, Université Ferhat Abbas, Sétif 1, Avenue Saïd Boukhraïssa, Maabouda 19000 SETIF, Algérie
Pascal.Picart@univ-lemans.fr

1. Introduction

La caractérisation et le contrôle des ondes en acoustique, et généralement en physique des ondes sont d'un grand intérêt. Plusieurs méthodes ont été développées pour fournir une vision qualitative et quantitative des champs acoustiques. L'imagerie des champs acoustiques est généralement réalisée à l'aide de réseaux de microphones [1]. Des techniques optiques ont été développées : vélocimétrie Doppler laser (LDV) [2], tomographie acousto-optique (AOT) [3], ou interférométrie à rétroinjection laser (LFI) [4]. Dans cet article, nous démontrons la preuve de concept de l'imagerie simultanée plein champ et multi-vues de champs acoustiques en utilisant l'holographie numérique couleur.

2. Relation phase optique-pressure acoustique

Le faisceau laser traversant le champ acoustique généré par un émetteur est perturbé par la pression acoustique en tout point du milieu de propagation. La phase optique est liée à l'indice de réfraction intégré selon une longueur L de propagation du faisceau optique. Avec l'hypothèse d'un processus adiabatique, la partie fluctuante de la phase optique est liée à la fluctuation de la pression acoustique $\langle p_{ac} \rangle$ est égale $\varphi_{ac} = 3\pi L r \langle p_{ac} \rangle / \lambda c_0^2$ (c_0 est la vitesse du son, $r = 0,1505 \times 10^{-3} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3$ est la réfractivité spécifique de l'air).

$$\psi(t) = \varphi_r + \varphi_r'(t) = \varphi_r + \varphi_{ac} \sin(\omega_{ac} t + \phi_{ac})$$

En considérant une séquence temporelle d'hologrammes numériques et la différence de phase entre deux instants consécutifs $\Delta\psi_n = \psi(t_{n+1}) - \psi(t_n)$, il est possible de déterminer l'amplitude et la phase acoustique par minimisation d'une norme L2

3. Dispositif expérimental et résultats

La Figure 1(a) montre le montage optique qui comprend trois lasers continus à $\lambda_R = 660\text{nm}$, $\lambda_B = 457\text{nm}$ et $\lambda_G = 532\text{nm}$. Le volume de mesure est éclairé simultanément le long de trois directions de propagation par les faisceaux rouge R (0°), bleu B ($21,3^\circ$) et vert G (90°) (Figure 1(b)). Le volume est excité par un émetteur à ultrasons à 40kHz. Les six faisceaux sont recombinaés sur une caméra à haute cadence (Photron SA-X2) avec une résolution spatiale de 1024×1024 pixels à 12500Hz. Le temps d'exposition est fixé à $1\mu\text{s}$. L'hologramme monochrome enregistré comprend trois hologrammes R-G-B multiplexés spatialement. Des images complexes selon chaque vue sont extraites par un filtrage spatial adapté à chaque vue. Les différences de phase temporelles sont calculées et traitées (non détaillé) pour obtenir l'amplitude et la phase acoustique.

La Figure 2 montre les amplitudes et phases acoustiques mesurées sur les 3 directions de visée R-G-B, exprimée en radians. On observe clairement les fronts d'onde acoustiques sur les 3 vues, bien que le niveau de bruit soit plus important sur les canaux G et B. On estime la longueur d'onde acoustique à $\lambda_{ac-exp} = 8,86\text{mm}$, et elle est très proche de la valeur théorique $\lambda_{ac} = 8,5\text{mm}$. Ainsi, ces résultats confirment que la méthode proposée est capable de fournir différentes vues d'un champ acoustique.

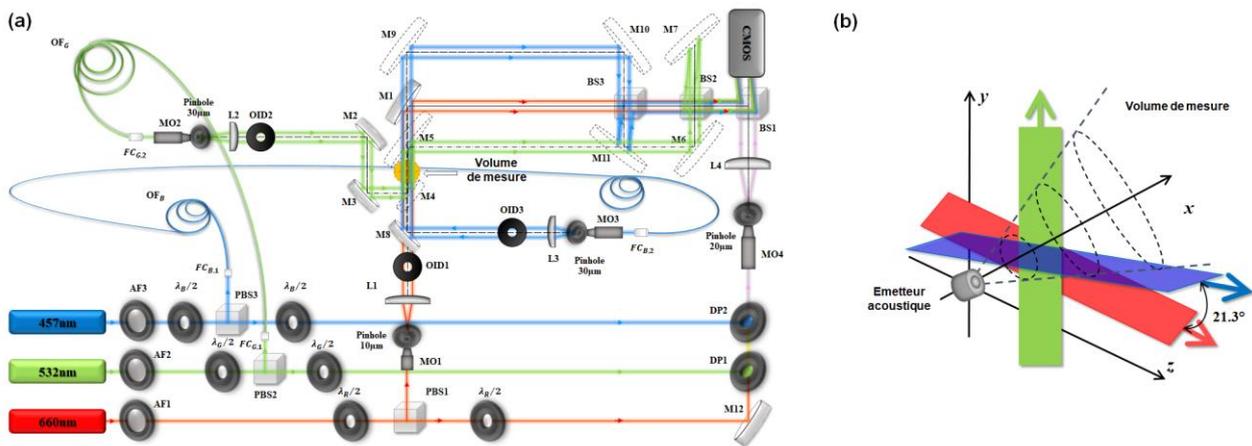


Figure 1. (a) Dispositif expérimental, (b) schéma du volume de mesure

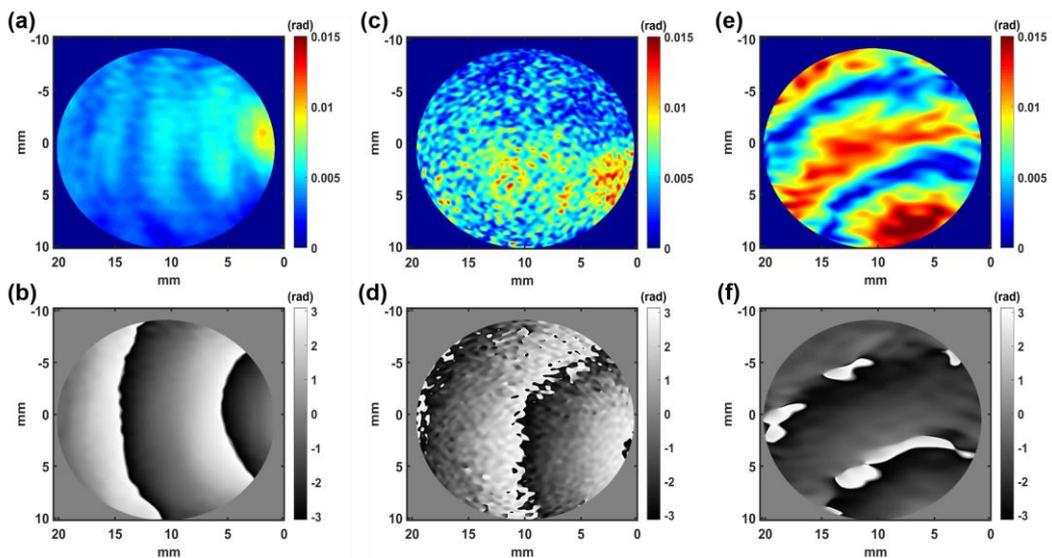


Figure 2. Amplitude et phase du champ acoustique, (a)-(b) selon la vue R, (c)-(d) selon la vue G, (e)-(f) selon la vue B

4. Conclusion

La méthode d'holographie trichromatique proposée permet d'obtenir des images de l'amplitude et de la phase d'un champ acoustique selon trois directions d'observation différentes. Cette approche ouvre une perspective sur la tomographie holographique de champs acoustiques.

5. Références

1. J.L. Flanagan, J.D. Johnston, R. Zahn et G. W. Elko, « Computer-steered microphone arrays for sound transduction in large rooms », J. Acoust. Soc. Am, Vol. 78, pp 1508-1518 (1985)
2. J. Schell, Frank et Schell, « Sound field simulation and visualisation based on laser Doppler vibrometer measurements », Forum Acousticum, pp 91-97 (2005)
3. A. Torras-Rosell, S. Barrera-Figueroa et F. Jacobsen, « Sound field reconstruction using acousto-optic tomography », J. Acoust. Soc. Am, Vol. 131, pp 3786-3793 (2012)
4. K. Bertling, J. Perchoux, T. Taimre, R. Malkin, D. Robert, A.D Rakic et T. Bosch, « Imaging of acoustic fields using optical feedback interferometry », Opt. Express, Vol. 22, pp 30346-30356 (2014)

(9) Méthode d'holographie numérique bi-couleur pour le diagnostic in-situ en fabrication additive laser

Matthieu Piniard¹, Béatrice Sorrente¹, Pascal Picart²

¹ DOTA, ONERA, Université Paris Saclay, 91123 Palaiseau, France

² Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, Institut d'Acoustique - Graduate School (IAGS), CNRS, Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS, France

matthieu.piniard@onera.fr, pascal.picart@univ-lemans.fr

1. Introduction

Au cours des deux dernières décennies, la fusion par faisceau laser (LBM) s'est imposée comme le principal procédé de fabrication additive métallique pour produire des structures de petites et moyenne tailles [1]. En raison des phénomènes physiques complexes impliqués dans l'interaction laser-matière, les instabilités de la morphologie du bain de fusion affectent la qualité finale de la structure et restent difficiles à prévoir par simulation. Plusieurs approches de surveillance, basées sur le rayonnement du processus du bain de fusion ou sur une source d'éclairage secondaire, ont été développées pour mesurer sa longueur, sa largeur et sa hauteur [1]. Néanmoins, la morphologie finale de la pièce est influencée par les forces volumétriques ainsi que par les forces capillaires appliquées au bain de fusion. Ainsi, la forme de la surface du bain de fusion est d'un intérêt primordial pour contrôler la stabilité du bain de fusion. En raison de son hétérogénéité intrinsèque, de son mouvement sur le lit de poudre et de sa propre dynamique, la mesure de la forme de la surface du bain de fusion nécessite une acquisition plein-champ en « une seule fois » avec un temps d'exposition court de quelques microsecondes. Dans cet article, nous proposons l'holographie numérique multi-longueur d'onde pour l'investigation in-situ du bain de fusion. La méthode a l'avantage d'être sans contact, non intrusive, et de fournir des données sur la forme de la surface en plein champ sans avoir besoin de scanner par balayage de la zone.

2. Dispositif expérimental

La méthode proposée est basée sur l'holographie numérique hors-axe et le multiplexage spatial d'hologrammes numériques à deux longueurs d'onde, la méthode devient "en temps réel", dans le sens où la forme de la surface peut être mesurée à chaque instant où les hologrammes sont enregistrés [2]. Avec une caméra à haute vitesse et des sources laser appropriées, le temps d'exposition peut être réduit à quelques microsecondes et un contrôle en temps réel peut être obtenu. Le système est couplé à une machine de fabrication laser (LBM). La Fig. 1 présente le dispositif holographique et la machine LBM simplifiée. Le dispositif est équipé de deux lasers polarisés linéairement (laser He-Ne 20mW à 632,8nm et diode laser CRL-DL635-050-SO-Optical-Isolator 50mW à 635,1nm). Des lentilles associées à un trou de 30 μ m permettent d'apurer ces deux sources. Les faisceaux de contrôle sont focalisés sur le lit de poudre avec un doublet achromatique de distance focale 300mm. Les lames dichroïques permettent de combiner les deux faisceaux d'éclairage de la zone d'étude. Les faisceaux de référence sont combinés sur le capteur d'images (caméra ORCA pixel 6,45 μ m) à l'aide de cubes 50/50. Les faisceaux de référence sont inclinés pour produire des hologrammes hors-axes de sorte que les hologrammes bi-couleur sont codés par multiplexage spatio-chromatique. Le démultiplexage des hologrammes permet de calculer les phases optiques sur les deux bras et leur différence fournit l'information de topographie de la zone d'étude (longueur d'onde synthétique égale à 173,73 μ m).

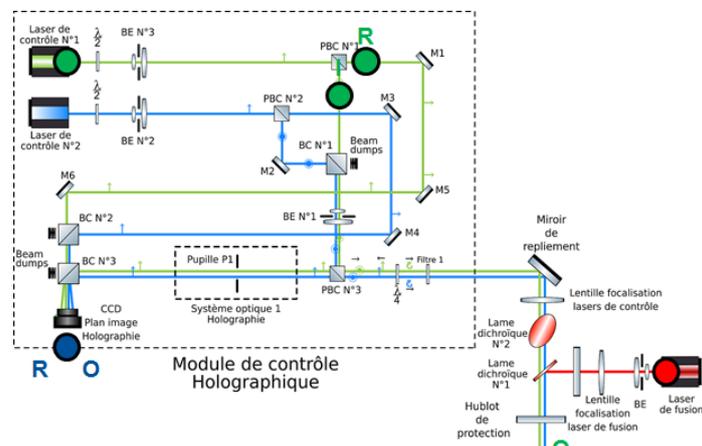


Figure 1. Dispositif d'holographie à deux longueurs d'ondes (haut-gauche) et machine LBM simplifié (bas-droite).

3. Résultats

Nous présentons quelques résultats expérimentaux pour le diagnostic in-situ du bain de fusion avec plusieurs mesures [2] sur la Fig. 2 : doubles cordons d'aluminium sur un substrat d'aluminium en Fig. 2(a), cordons d'aluminium sur un substrat d'aluminium avec une vitesse d'entraînement de 200 mm/s (Fig. 2(b)), bain de fusion sur une feuille de métal 316L avec une vitesse d'entraînement de 100 mm/s (Fig. 2(c)), et bain de fusion avec une poudre 316L sur un substrat 316L avec une vitesse d'entraînement de 100 mm/s (Fig. 2(d)).

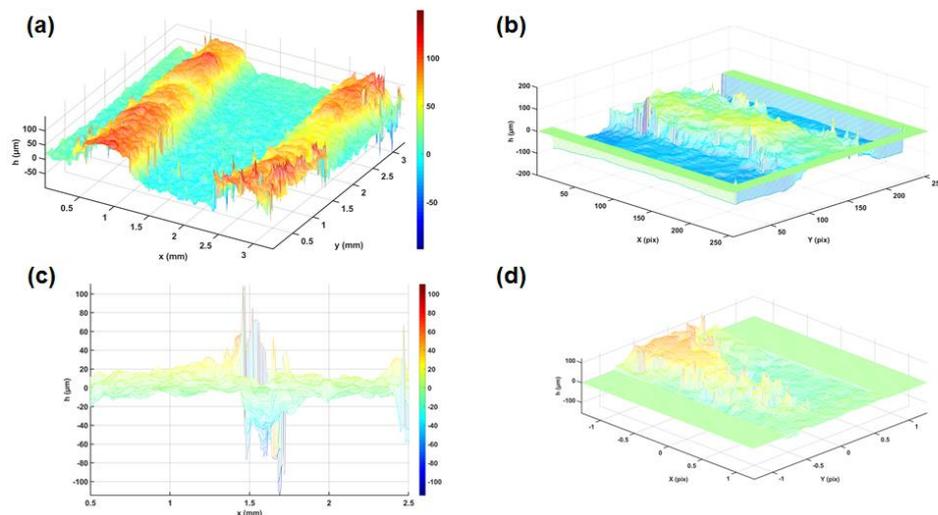


Figure 2. (a) topographie de doubles cordons d'aluminium sur un substrat d'aluminium, (b) topographie de cordons d'aluminium sur un substrat d'aluminium avec une vitesse d'entraînement de 200 mm/s, (c) topographie du bain de fusion sur une feuille de métal 316L avec une vitesse d'entraînement de 100 mm/s, (d) topographie du bain de fusion avec une poudre 316L sur un substrat 316L avec une vitesse d'entraînement de 100 mm/s.

4. Conclusion

À notre connaissance, ce résumé présente les premiers résultats de mesures sur machine LBM de la forme de la surface du bain de fusion et de cordons en mesure plein champ et in-situ.

5. Références

1. T.S. Srivatsan and T.S. Sudarshan (Eds), Additive manufacturing: innovations, advances, and applications, CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016.
2. M. Piniard, Contrôle en ligne du procédé Laser Beam Melting : apports de l'holographie numérique à deux longueurs d'onde, Thèse de Doctorat, Sorbonne Université (2021).

(10) Implementation of the crossed-sine wavefront sensor

Yan Feng n°1, François Hénault n°1, Alain Spang n°2, Laura Schreiber n°3, Jean-Jacques Correia n°1, David Mouillet n°1, Eric Stadler n°1, Yves Magnard n°1, Thibaut Moulin n°1 and Alain Delboubé n°1

(1) Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble, Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble, France

(2) Université Côte d'Azur, Observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, Laboratoire Lagrange, France

(3) INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna, Via Gobetti 93/3, 40129 Bologna, Italy

1. Introduction

ASONG (Analyseur de Surface d'Onde de Nouvelle Génération) is a new concept of wavefront sensor (WFS) which makes use of a gradient transmission filter (GTF) on the focal plane with a crossed-sine pattern, such that it is also called the crossed-sine WFS. Based on a GTF and a 2x2 mini-lens array (MLA) which can produce four pupil images on a detector, ASONG could measure optical wavefronts on extended objects [1]. After the simulation work which demonstrated the wavefront reconstruction capability, we are in the phase of the implementation of the prototype in the lab. A micro-LED array display is applied for creating “free-pattern” light sources, and an image detector with an appropriate number of pixels is arranged for recording four pupil images. ASONG could achieve a simultaneous high spatial resolution at the pupil of the tested optics and absolute measurement accuracy comparable to that attained by laser-interferometers.

2. The ASONG first prototype

The first ASONG wavefront sensor prototype and its optical key components (GTF on the left panel and MLA on the right one) are shown in Figure 1. The physical size of the prototype fits a volume of 92 x 52 x 40 mm³, including the alignment tool. As a reference for the expected volume of the final version of ASONG, the implemented camera has a side of 30 mm. The mechanical parts are anodized in order to avoid internal unwanted reflection. The main optical components (GTF and MLA) box can be adjusted in focus, centering and rotation.



Figure 1. (a) Picture of the first realized ASONG prototype including alignment tool; (b) The ASONG optical key components integrated in the prototype.

The value of the GTF period implemented in an actual prototype assures both large sensitivity and dynamic range. Different technologies and materials are under investigation for the GTF and MLA fabrication. The actual prototype mounts a 2 mm thick glass GTF and a PMMA MLA.

3. Test optical configuration

A preliminary prototype was procured and integrated to assess the ASONG wavefront sensing capability in terms of resolution and precision. The test set-up is shown schematically in Figure 2. A micro-LED array display (Jade Bird Display JBD5UM720P-R that yields 720p resolution with 633 nm wavelength and 1,9 μ m diameter emitters on 5 μ m pitch) is applied for creating “free-pattern” and possibly extended light sources. An achromat “Lens 1” (focal length f_1 150 mm) collimates the light. The collimated beam goes through a pupil mask with a pupil of 25 mm in diameter, and is refocused by a second achromat “Lens 2” (focal length f_2 500 mm). The ASONG prototype is placed in order to have the GTF on the focal plane of compound Lens 1&2 system, while the MLA is consequently ~ 0.5 mm away. The prototype detector records four well-sampled (1000 x 1000 pixels) images of the pupil with a pixel size of 2.4 μ m (FLIR Blackfly S). An “in house” pipeline

written in IDL® (Interactive Data Language) is used to compute the wavefront derivatives from the intensities variation of the pupil images as described in [2] and to deliver WFE measurements.

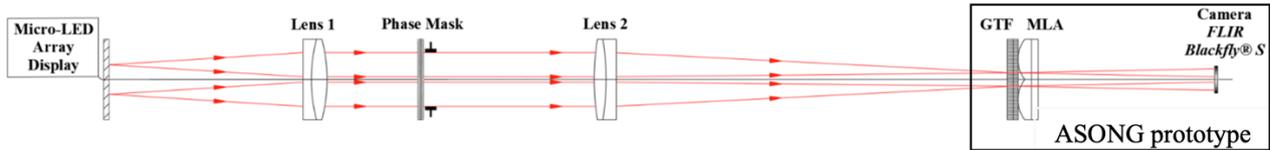


Figure 2. The optical configuration of the ASONG prototype and its test set-up.

4. The ASONG specifications

In order to test and characterize ASONG, the ideal configuration is to add to the system a known WFE and to compare it with the one measured by our prototype. Two approaches have been used to introduce known aberrations: 1. Known defocus and tip-tilt WFE can be easily introduced by acting on the source position w.r.t. the Lens 1 (or on the prototype position w.r.t. the Lens 2). For this reason, the Micro-LED array has been mounted on X-Y linear stages with a 50 mm range and 10 μm steps; 2. Phase masks with specific patterns can be positioned in the set-up pupil plane and measured with the WFS. In this case a reference measurement of the phase mask, taken with a competitor instrument like a laser-interferometer, is mandatory. Based on a series of measurements, the ASONG specifications are obtained as shown in Table 1.

Table 1. The ASONG specifications

| Parameter | Definition / Remark | Value |
|------------------------|---|---------------------|
| Spatial Resolution | Pupil size / Number of pupil pixel sampling | 25 μm |
| Accuracy | Closeness of the measurements to the 'true' value | $\lambda/200$ |
| Sensitivity | The smallest WFE RMS detectable | $\lambda/500$ |
| Repeatability | RMS of multiple sets of measurements dispersion | $\lambda/500$ |
| Dynamic Range | Width of WFE RMS linear range | 20λ defocus |
| Phase Point Resolution | Pupil pixel sampling | 1000 \times 1000 |

We recall that the first ASONG prototype is built with first attempt key optical components and higher quality GTF and MLA are available for testing since the measurements were made. A better pupil optical quality, and consequently higher performance, will be achievable using higher quality optical elements, i.e. a glass MLA. The results will be reported in future publications.

5. Conclusions and future developments

ASONG collects in an elegant and simple solution, high spatial resolution, high sensitivity and a wide dynamical range. These characteristics make it particularly interesting for different applications, from ophthalmology, to optical metrology and possibly active/adaptive optics. The current application has not been studied yet in terms of capability to work in low SNR conditions, but ASONG might find an application in small telescopes aberration correction. Different use cases will be studied in the near future.

6. References

1. F. HÉNAULT, A. SPANG, Y. FENG, L. SCHREIBER, « Crossed-sine wavefront sensor for adaptive optics, metrology and ophthalmology applications », Engineering Research Express, Vol. 2, N°015042, (2020).
2. F. HÉNAULT, « Fresnel diffraction analysis of Ronchi and reverse Hartmann tests », JOSA A, Vol. 35, N° 10, pp1717-1729 (2018).

(11) Imagerie photoacoustique des vaisseaux sanguins avec correction des artefacts de visibilité

G. Godefroy, I. Falco, C. Constans, B. Arnal, E. Bossy

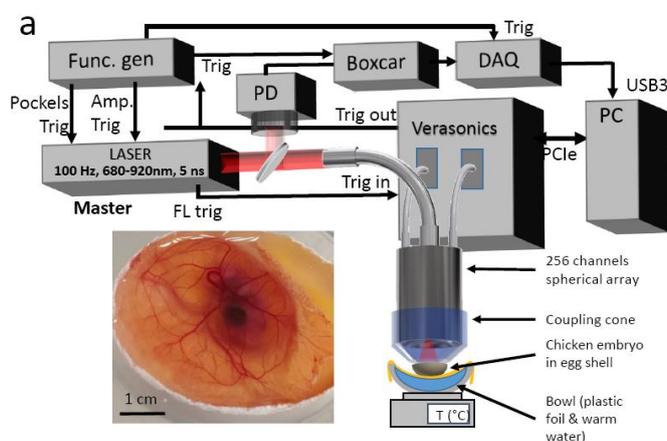
LiPhy, Université Grenoble Alpes, CNRS
140 rue de la Physique, CS 47100, 38058 Grenoble Cedex 9

1. Introduction

L'imagerie photoacoustique est une technique d'imagerie biomédicale émergente permettant d'imager des propriétés optiques au-delà des limites de diffusion de la lumière. Nos travaux concernent l'imagerie photoacoustique à résolution acoustique à des profondeurs centimétriques. Les images sont réalisées à partir d'une illumination laser proche-infrarouge en champ large et des détecteurs acoustiques (typiquement entre 5 et 30 MHz de fréquence centrale). La résolution peut atteindre typiquement 100 μm ce qui permet d'imager la plupart des gros vaisseaux sanguins. Néanmoins, les artefacts de visibilité empêchent de visualiser les vaisseaux verticaux ainsi que l'intérieur des gros vaisseaux. Nous proposons de présenter notre instrumentation ainsi que deux techniques de résolution des artefacts de visibilité. Une première technique repose sur la dynamique des flux sanguins et améliore les images en quantifiant les fluctuations d'absorption optique dues aux mouvements des globules rouges. Cette technique a permis de mesurer l'oxygénation en 3D à visibilité totale dans l'embryon de poulet. L'autre approche repose sur les réseaux de neurones et utilise une banque de données expérimentales pour l'apprentissage.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif est composé d'un laser pulsé (5 ns, cadence 100 Hz) réglable de 680 à 900 nm. Pour re-normaliser nos images par la fluence incidente, une partie du faisceau est captée par une photodiode calibrée, dont le signal est intégré par un intégrateur à porte et numérisé à faible fréquence d'échantillonnage (6 kHz).



La lumière est couplée à l'échantillon via un bundle de fibre optique (8 mm de diamètre, >2000 fibres monomodes) pénétrant dans un trou central situé dans le transducteur. Le transducteur est composé de 256 éléments piézoélectriques (fréquence centrale 8 MHz, bande passante >70%) de 2 mm de diamètre répartis sur une surface sphérique [1]. Un cône rempli d'eau permet le couplage acoustique à travers une membrane de latex transparente (préservatif).

Figure 3 Dispositif expérimental d'imagerie photoacoustique 3D

3. Imagerie de fluctuation photoacoustique (multi-spectrale)

Une série d'images est acquise dans la membrane chorioallantoïque d'un embryon de poulet. Les images sont formées, à partir de signaux radio-fréquences, de manière conventionnelle avec un algorithme delay-and-sum (DAS). Toutes ces images individuelles présentent les artefacts de visibilité (Figure 4a). L'imagerie de fluctuation (PAFI) permet de restaurer la visibilité de tous les vaisseaux ainsi que de remplir les vaisseaux de grand diamètre (Figure 4b), mais aussi améliore le contraste en réduisant les effets de lobes de réseaux dus à l'utilisation d'une sonde parcimonieuse. Cette technique a été étendue à la spectroscopie, notre laser pouvant changer de longueur d'onde entre chaque tir. À l'aide de 10 longueurs d'onde entre 700 et 900 nm, le spectre de l'hémoglobine

observé est ajusté entre ceux de l'oxyhémoglobine et de la desoxyhémoglobine donnant la saturation en oxygène (SO₂). Alors que l'image SO₂ conventionnelle DAS ne fournit d'information que dans peu de vaisseaux, l'image Multispectral-PAFI (MS-PAFI) permet d'imager la SO₂ dans beaucoup plus de structures. Nous évaluons la capacité de cette technique à fonctionner *in vivo*.

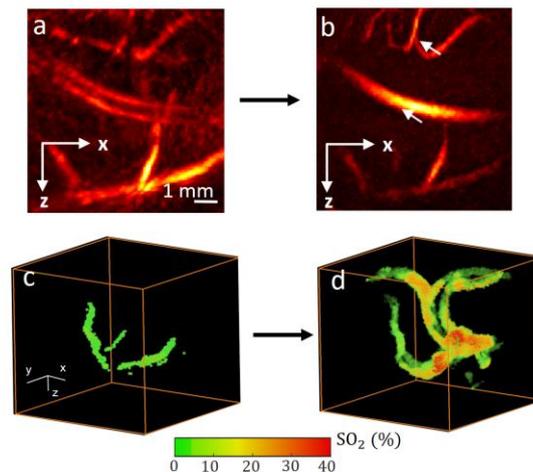


Figure 4 a) Image photoacoustique 3D conventionnelle (delay-and-sum). b) Image de fluctuation PAFI. c) Image de SO₂ obtenue par imagerie photoacoustique multispectrale. d) Imagerie de SO₂ MS-PAFI de la même zone.

4. Amélioration des images photoacoustique par apprentissage profond.

Précédemment, nous avons montré que l'on pouvait améliorer les images photoacoustique à 2D par des réseaux de neurones de convolution de type UNET. Toutefois, les images expérimentales de référence étaient formées à partir de photographies et il était nécessaire de trouver une autre manière de réaliser ces images de référence *in vivo*. Nous montrons que grâce à l'imagerie PAFI, nous pouvons entraîner un réseau à corriger les effets de visibilité limitée en 3D à l'aide de données expérimentales, le réseau étant pré-entraîné avec des simulations.

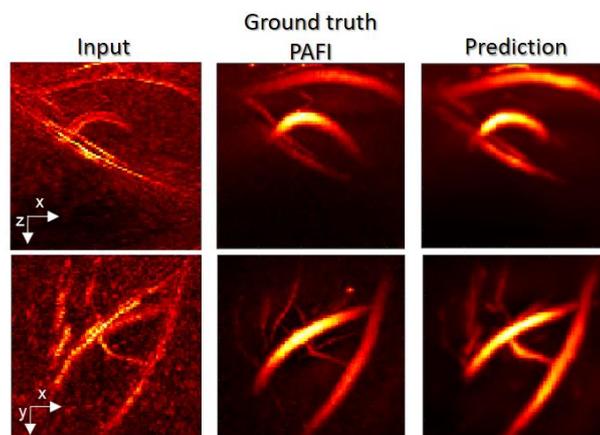


Figure 5 Imagerie améliorée par Deep Learning. Gauche: input image conventionnelle DAS, Centre : Référence PAFI, Droite : Prédiction

5. Références

1. Vilov, S., Godefroy, G., Arnal, B., & Bossy, E. (2020). Photoacoustic fluctuation imaging: theory and application to blood flow imaging. *Optica*, 7(11), 1495-1505.
2. Godefroy, G., Arnal, B., & Bossy, E. (2021). Compensating for visibility artefacts in photoacoustic imaging with a deep learning approach providing prediction uncertainties. *Photoacoustics*, 21, 100218.

(12) Sensor fault detection using machine learning applied on acoustic test bench

Thibaut Le Magueresse⁽¹⁾, Jérémie Derré⁽²⁾, Florent Mercat⁽²⁾

(1) Amiral Technologies, 12 rue Ampère, 38000 Grenoble, France

(2) Airbus Operations S.A.S., Acoustics Testing Team, 316 route de Bayonne, 31060 Toulouse Cedex 09, France

1. Introduction

This paper presents a study of sensor fault detection from an acoustic test bench, performed by machine learning. The concerned rig is based on the modal generation and detection principle, aiming at characterizing the acoustic properties of engine liners. Such a test mean is instrumented with a large number of sensors (i.e. more than a hundred and seventy sensors), and used in the frame of heavy experimental campaign with significant test matrices. In that context, it is of prime interest to ensure that all the sensors are behaving as expected, and to validate the current test point, before moving forward and change the configuration. Data validation becomes therefore fundamental, as the causes of failure are numerous in such a complex environment, and automatic processing avoids time losses, especially regarding the huge data quantity. The proposed approach lies in machine learning software, whose inputs are the temporal raw data, which therefore do not need to be pre-processed. First comparisons between the AI and human validations are presented in this paper.

2. ModSquare acoustic test bench presentation

The ModSquare test bench is dedicated to the characterization of aircraft engine liners thanks to the acoustic modal detection method [1,2]. A plane source constituted by 56 loudspeakers generates higher order acoustic transverse modes in a straight duct with rectangular cross-section (see Figure 1). This noise source is then characterized thanks to a first microphones antenna constituted by 114 microphones allowing modal detection and waves sorting between acoustic waves propagating forward and backward. Next section of the test bench includes the acoustic liner to be tested, placed on a wall of the duct. Finally, a second modal detection antenna of 57 microphones characterizes the acoustic field after the test section. This second modal detection antenna does not perform waves sorting as an anechoic ending allows to free from any reflexion.

In the frame of this study, the test section consists in a hardwall section, and the test matrix consists in 118 measurements of 5 seconds each, each measurement corresponding to one generated mode at source. Acquisition is performed with the 171 microphones at 16384 points per second, generating a total of about 20 Go of time-data for a full test matrix.

Three test matrices of 118 measurements each were used in this study, in order to assess the performance of failure detection model, each matrix being used to generate a database respectively for model training, model validation and model test.

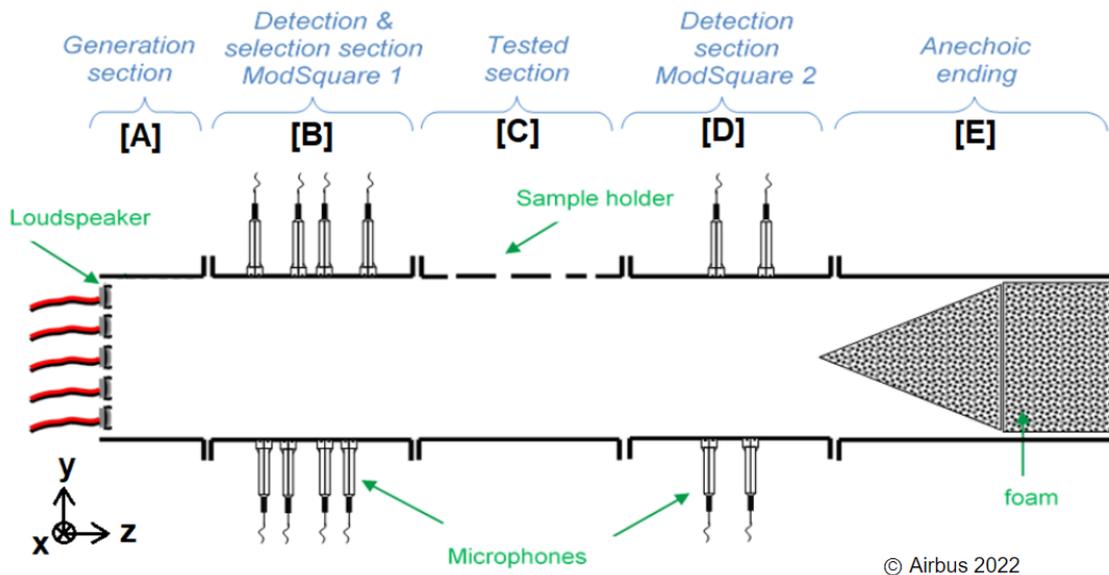


Figure 1. Sketch of the ModSquare test bench (rectangular section duct), with 171 flush-mounted microphones. Acoustic liner to be tested is excited thanks to loudspeakers antenna located on the left.

3. Machine learning model

The machine learning model has been built by DiagFit®, a blind failure prediction software for industrial equipment edited by Amiral Technologies [3]. It consists in a sequence of modules containing a feature extractor, a blind failure detection model and a failure identification model. The blind failure detection model is learnt using the healthy data free from any faults. Coupled with the feature extractor, it detects any deviation from the normality without need of failure history. The failure identification model has the responsibility to classify the anomaly. If the fault occurs for the first time, the model should declare it as novelty.

Four types of failure have been tagged in the training data: an electrical noise characterized by a Dirac comb, a wideband noise, a surrounding noise generated by impulsive events around the bench and instabilities caused by loud-speaker defect.

4. Modal training and validation

The blind failure detection model has been trained on healthy data. At the same time, the tagged data have been exploited to build the failure identification model. In both cases, only one percent of the total amount of the training matrix have been used. This has been possible thanks to the data redundancy and the relevance of the DiagFit® feature extractor. Figure 2 depicts the concatenated time series corresponding to the training and validation sets over time. The validation of the model has been carried out by training the model on the first half of this subset and by validating it on its second half.

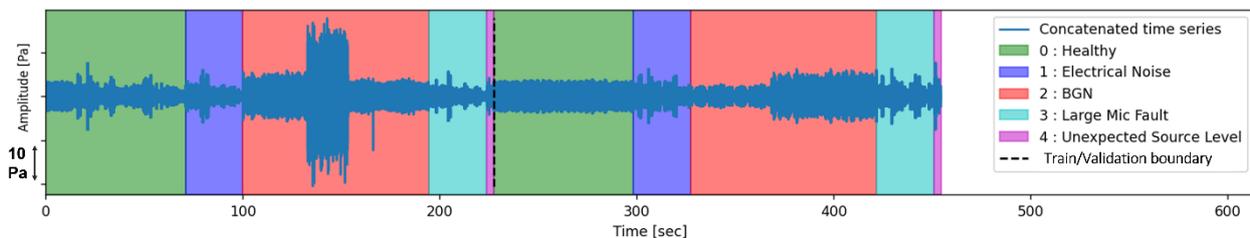


Figure 2: Time series corresponding to training data (around 7 million samples in total). In green, the representative samples of healthy data and successively in mauve, red, blue and purple the defects linked to electrical noise, impulsive noise, wideband noise and loudspeaker instabilities. The dashed black line represents the train/validation separation line.

The model has been applied on the second half part of the dataset presented in Figure 2. Figure 3 presents the results produced by DiagFit® including two types of output. First, the

health indicator indicates the presence of failure in the data when it is superior to a certain threshold. The red zone represents the true presence of the failure. Except two punctual events located between 205 and 300 seconds, the detection is nearly perfect. This first output is crucial in order to detect new failures never seen in the past. Second, the model succeeded to identify the failure with a metrics of F1-Score [4] equal to 0.96. The learning time took 20 seconds, enough to learn the behavior of 20 Go of data.

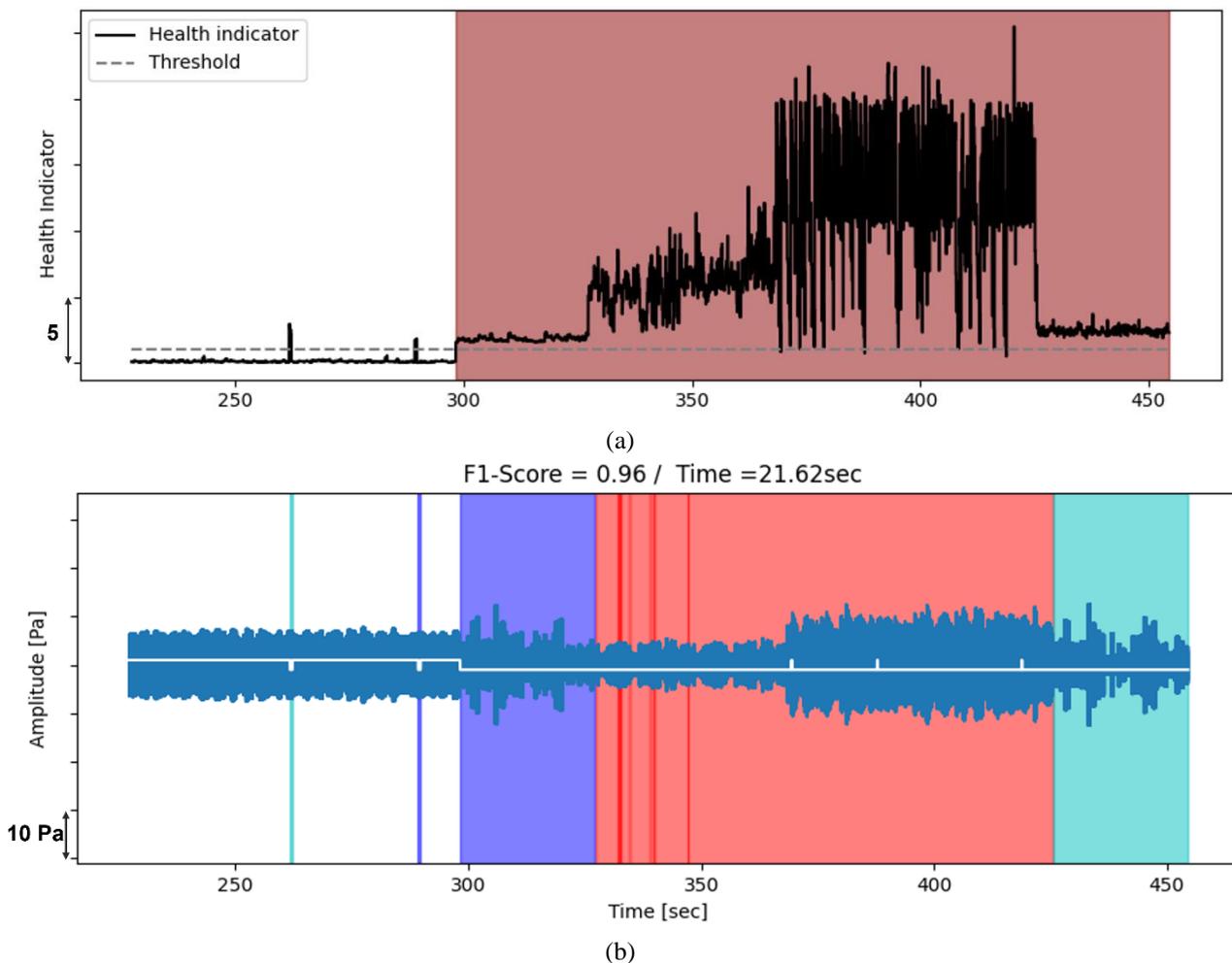


Figure 3: Blind failure prediction as a health indicator (a) and classifier prediction for the failure identification (b). The red zone of the first graph indicates the presence of a real fault. The colors of the second graph follow the same colormap as the Figure 2.

5. Results and discussion

The learnt model has been applied to the test matrix. An example of results corresponding to a measurement of 5 seconds extracted from the test dataset is presented in Figure 4. The model prediction is globally in accordance with the human defect identification. In details, one can observe that the large microphone default (represented by a yellow horizontal line) is not tagged and predicted on the same sensor. After checking, it turns out that the model did the right prediction. Moreover, the model can predict with precision the intermittence presence of the default (see the blue top line), when the human tag is more global. Finally, the model found a new defect at the very beginning of the record, which has been validated thereafter.

DiagFit® model detected automatically with reliability the presence of failures in the test dataset. In addition, it raised new defects which were not tagged, but nevertheless very real ones. It is indeed difficult for a human to be exhaustive in the manual failure detection in such a large dataset.

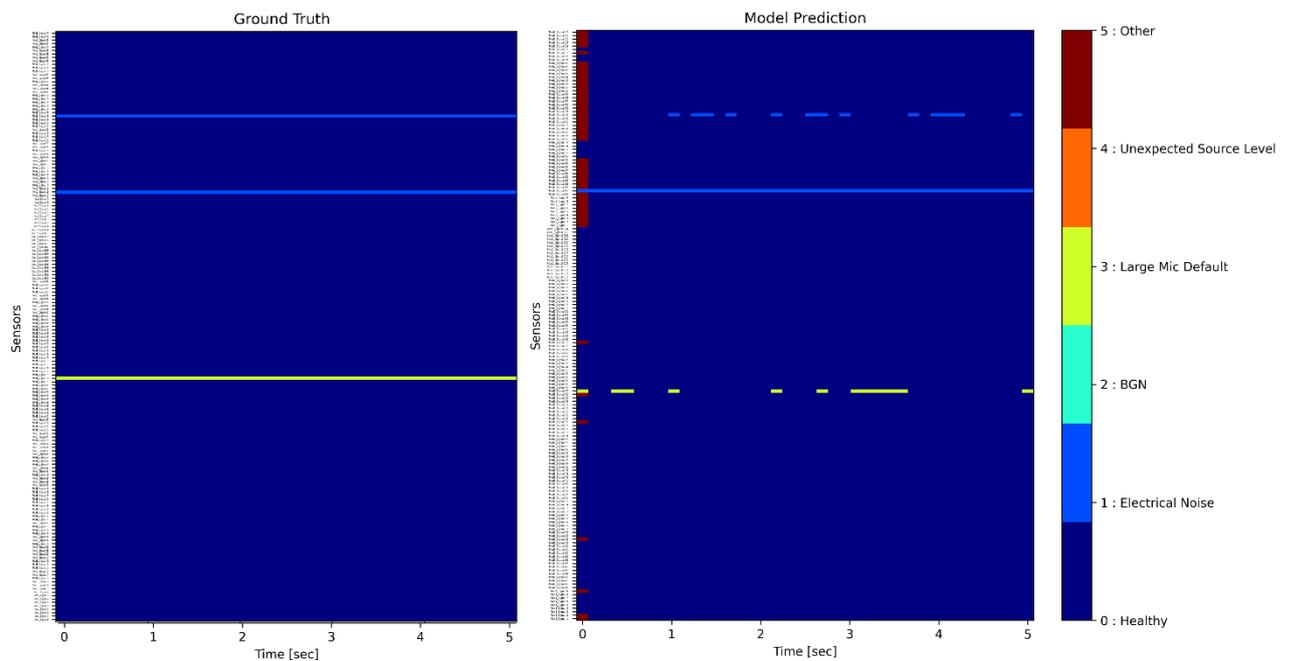


Figure 4: Result comparison between the human identification (left) and model prediction (right). Colors indicate the type of failure to detect over time (x-axis) for the whole 171 microphones (y-axis) for 5 seconds measurement.

6. Conclusion

This study presents the results of a sensor defect detection performed by machine learning and applied to an experimental acoustic test bench. The approach is based on a first phase of learning over manually labelled data, and then the learned model is applied to raw data, which are directly the acquired temporal data in the rig. A comparison between human defect identification and machine learning prediction is proposed. It exhibits interesting information, as for instance the fact that a sensor defect is not necessarily present during all the record time but rather by intermittence. It also permits to limit human error, especially in such an industrial context with large quantity of data.

7. Acknowledgments

This study has been partially realized in the frame of the MAMBO project (sous-flux 1.2), financed by the DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile, the French civil aviation authority) under the Convention 2021-50. The second author wants to thank Marcelle Gomes for her contribution on this topic.

8. References

1. J. DERRÉ, F. MERCAT, O. DEILLE, E. JULLIARD, « Validation of the instrumentation and measurement of an acoustic liner test rig by a combined Frequency and Modal approach », 28th AIAA/CEAS Aeroacoustics 2022 Conference (2022)
2. J. DERRÉ, F. MERCAT, O. DEILLE, E. JULLIARD, « Multi-criteria approach for instrumentation and measurement validation: application to a fully rigid duct with modal detection », 16eme Congrès Français d'Acoustique, Marseille (2022)
3. S. LE GALL, T. LE MAGUERESSE, « Benchmark : Comparison of failure prediction models », White paper, Amiral Technologies (2021)
4. A. GÉRON, Hands-on Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow, Dunod, 2019.

(13) Accélérométrie, vélocimétrie et chronologie de la position de particules en mouvement dans l'espace avec l'imagerie à quatre dimensions

Alexis Matwyschuk et Nicolas Metzger

Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis
5, rue du Général Cassagnou BP70034 68301 Saint-Louis Cedex

alexis.matwyschuk@isl.eu

1. Introduction

Parmi les méthodes optiques pour la mesure tridimensionnelle en vélocimétrie, la méthode RVV (Rainbow Volume Velocimetry) [1] utilisant une illumination « arc en ciel » permet de connaître la position en profondeur d'une particule à partir de la couleur observée sur elle. Le nombre de couleurs obtenu après la dispersion d'un faisceau de lumière blanche [2] améliore la résolution en profondeur. Par contre, la trajectoire est déterminée seulement à partir des images vidéo [3]. Récemment, le principe d'imagerie active à crénelage temporel multi-longueurs d'onde WRAI combiné a démontré la possibilité d'enregistrer un objet en mouvement dans un espace à 4 dimensions représenté par une seule image et de déduire sa trajectoire et sa vitesse [4]. Il fait la distinction entre les longueurs d'onde de couleurs chaudes pour déterminer la profondeur et les longueurs d'onde de couleurs froides pour déterminer le temps. L'inconvénient est que le nombre de couleurs chaudes est limité réduisant ainsi la résolution. Sur la base de ce principe complété par la méthode RVV, la mesure tridimensionnelle en vélocimétrie et en accélérométrie a été réalisée en imagerie à 4 dimensions avec une meilleure résolution indépendamment de la fréquence vidéo [5].

2. Principe

Il est possible grâce au principe WRAI dans sa forme juxtaposée de restaurer la scène 3D directement sur une seule image [6, 7]. Chaque longueur d'onde correspond à une zone visualisée à une distance différente dans la scène. Dans sa forme superposée [8] les longueurs d'onde correspondent à des instants précis. Pour combiner les deux formes, les longueurs d'onde ont été classées en deux catégories de couleur : chaudes pour la profondeur et froides pour le temps. Comme la résolution de la profondeur dépend de la largeur de l'impulsion lumineuse et du temps d'ouverture de la caméra, pour l'augmenter, il est nécessaire de réduire ces deux paramètres. Cependant un temps d'ouverture très court est difficile à réaliser. Mais puisque la scène est bornée, l'illumination de couleurs chaudes peut être verticale à condition que les tranches de longueurs d'onde soient perpendiculaires à la ligne de visée de la caméra. C'est à ce niveau que la forme superposée diffère et se rapproche de la méthode RVV. La profondeur n'est plus définie par rapport aux largeurs d'impulsion mais à la place des longueurs d'onde de l'illumination verticale.

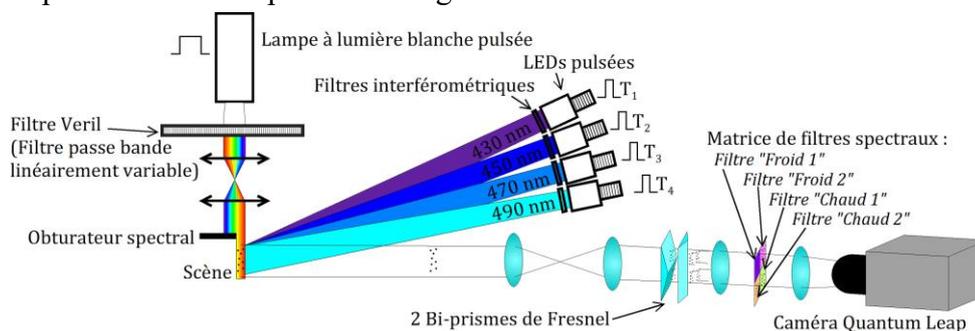


Figure 1. Montage d'imagerie multi-longueurs d'onde

3. Résultats expérimentaux

Pour valider le principe combiné WRAI complété par la méthode RVV, nous avons visualisé la trajectoire de particules, représentées par des grains de riz, se déplaçant dans une scène grâce au montage optique (Cf. Figure 1). Ce montage était composé d'une illumination pulsée de couleurs chaudes, d'une illumination pulsée de couleurs froides et d'une caméra intensifiée triggeable. La répartition spectrale des couleurs chaudes a été obtenue après la dispersion d'un faisceau de lumière blanche pulsée suivie d'un obturateur pour supprimer les couleurs froides. Le multiplexage en

quatre voies de l'image de la scène a été réalisé avec deux bi-prismes de Fresnel. L'identification des longueurs d'onde est restée la même [4] avec le rapport des deux trames dans chaque catégorie de couleurs. Après le contrôle et l'étalonnage de l'ensemble, la trajectoire de grains de riz déversés dans la scène a été visualisée. Les résultats des essais ont confirmé qu'à partir d'une seule image à 4 dimensions, il était possible de connaître à des instants précis la position, la vitesse et l'accélération de particules en mouvement dans un espace 3D. La position relative a été obtenue avec une précision de l'ordre de 0.5 mm. L'avantage de cette méthode d'imagerie apparait nettement lorsque les résultats sont comparés avec l'image 2D (Cf. Figure 2) qui donne l'impression que les grains vont se rencontrer. De ce fait, il ne pourra plus y avoir d'ambiguïté dans les trajectoires.

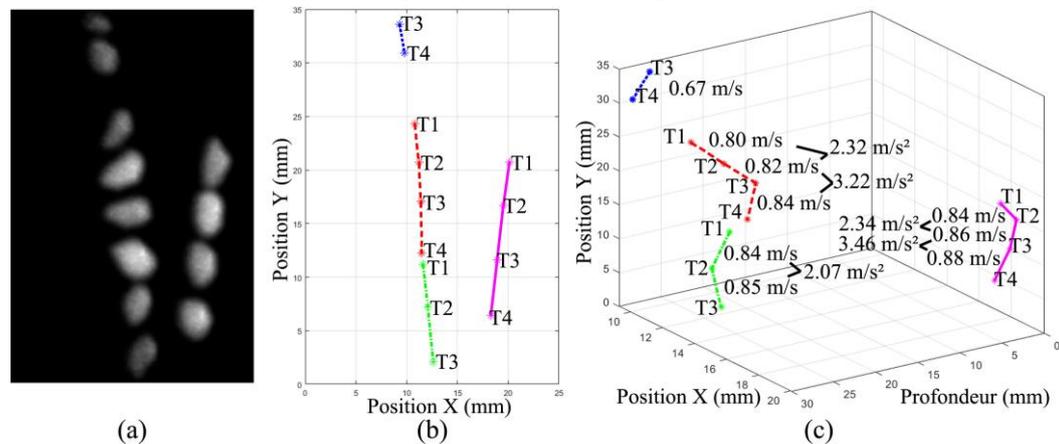


Figure 2. Déplacement de grains de riz (a) d'une manière stroboscopique dans une image 2D et en imagerie 4D avec la chronologie dans (b) le plan XY et dans (c) un espace 3D avec leurs vitesses et leurs accélérations

4. Conclusion

Le principe combiné WRAI complété par la méthode RVV a montré et validé la possibilité de connaître directement à partir d'une seule image à 4 dimensions la trajectoire, la vitesse et l'accélération de particules en mouvement dans un espace borné avec une meilleure résolution et la chronologie du passage de chaque particule. Les essais réalisés à partir de projections de grains de riz ont dévoilé la capacité d'éviter des confusions dans les trajectoires. Concernant les perspectives, l'analyse du comportement de ces objets dans l'espace-temps avec une image 4 dimensions pourrait intéresser certains domaines scientifiques comme l'aérodynamique dans les souffleries.

5. Références

1. J. P. Prenel, Y. Bailly, and M. Gbamele, "Three Dimensional PSV and Trajectory by means of a Continuous Polychromatic Spectrum Illumination," in *2nd, Pacific symposium on flow visualization and image processing; PSFVIP-2*, P. S. o. V. a. I. Processing, ed. (S Mochizuki Honolulu, HI 1999), p. 77.
2. T. J. McGregor, D. J. Spence, and D. W. Coutts, "Laser-based volumetric colour-coded three-dimensional particle velocimetry," *Optics and Lasers in Engineering* **45**, 882-889 (2007).
3. K. Laurent, M. Barthès, V. Lepiller, and Y. Bailly, *Development of a 3D Particle Tracking Velocimetry method and its associated Python-coded software for image processing* (2015).
4. A. Matwyschuk, "Combination of the two styles of the multiple-wavelength range-gated active imaging principle for four-dimensional imaging," *Applied Optics* **59**, 7670-7679 (2020).
5. A. Matwyschuk, "Doppler effect in the multiple-wavelength range-gated active imaging up to relativistic speeds," *J. Opt. Soc. Am. A* **39**, 322-331 (2022).
6. A. Matwyschuk, "Direct method of three-dimensional imaging using the multiple-wavelength range-gated active imaging principle," *Applied Optics* **55**, 3782-3786 (2016).
7. A. Matwyschuk, "Multiple-wavelength range-gated active imaging principle in the accumulation mode for three-dimensional imaging," *Applied Optics* **56**, 682-687 (2017).
8. A. Matwyschuk, "Multiple-wavelength range-gated active imaging in superimposed style for moving object tracking," *Applied Optics* **56**, 7766-7773 (2017).

(14) Vibromètre laser plein champ dans le domaine de Fourier

O. Jacquin, O. Hugon, E. Lacot

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy),
«eric.lacot@univ-grenoble-alpes.fr»

1. Contexte et objectif :

L'imagerie photoacoustique est en pleine expansion depuis une quinzaine d'années car elle permet de combler un manque dans l'ensemble des techniques disponibles en imagerie biomédicale [1,2,3]. Elle combine les avantages d'un contraste d'absorption optique élevé avec le fort pouvoir de pénétration des ondes acoustiques. Le principe de la tomographie photoacoustique (PAT) est de générer, par absorption optique, puis par effet thermoélastique, des ondes de pression acoustique à l'intérieur d'un milieu d'intérêt biologique. Après propagation, ces ondes sont enregistrées à la surface de l'échantillon à analyser, à l'aide de capteurs ultrasonores et une image tridimensionnelle d'absorption optique peut alors être reconstruite par la résolution d'un problème inverse. Dans cette approche, les barrettes de transducteurs piézoélectriques utilisés sont des objets souvent encombrants, nécessitant une mise en contact direct (pour des raisons d'adaptation d'impédance acoustique) avec l'échantillon à imager. Même si elles sont extrêmement sensibles à de très faibles pressions acoustiques, les barrettes de transducteurs piézoélectriques présentent l'inconvénient d'être à bande passante limitée (typiquement quelques MHz) et d'être particulièrement gênantes pour l'excitation optique, lors de mesures en épi-collection.

De son côté, l'interférométrie optique permet, sans contact, une mesure non-destructive de haute précision de déformations ou de vibrations [4,5,6]. L'objectif de ce travail de recherche est de développer un système d'imagerie optique interférométrique plein champ, pour la détection surfacique des ondes de pression générées par effet photoacoustique (Figure 1). L'appareil réalisé devra être capable de détecter, des déplacements sub-nanométriques induites par des ondes de pressions (i.e. des ondes acoustiques) avec des fréquences de vibration de l'ordre de quelques mégahertz.

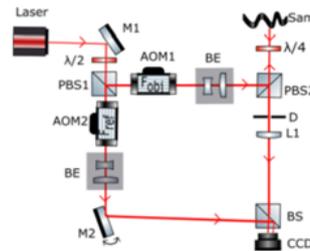
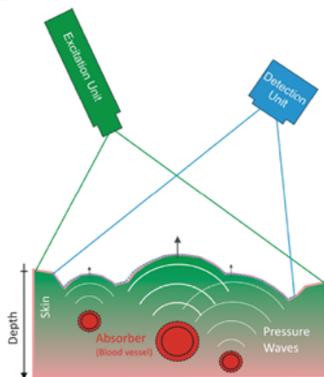


Fig.1) Gauche [5]: Illustration de la méthode envisagée pour la détection surfacique des ondes de pressions La lumière d'excitation (un laser pulsé) est appliquée à l'ensemble du volume à imager. Des ondes de pressions sont générées par l'expansion thermoélastique des absorbeurs (des vaisseaux sanguins). Le déplacement de la surface induit par les ondes de pression est détectée optiquement en surface au moyen d'un vibromètre laser
Droite: Vibromètre laser dans le domaine de Fourier

2. Vibromètre laser dans le domaine de Fourier :

Pour détecter les ondes de pression photoacoustique nous proposons de développer un vibromètre laser dans le domaine de Fourier. Dans cette méthode d'imagerie optique, un faisceau laser élargi éclaire de manière continue (i.e. pas de manière pulsé) la surface d'un objet diffusant, qui en réponse produit un champ de speckle. Un dispositif interférométrique réglé en coin d'air permet de générer des franges d'interférence rectilignes avec une fréquence spatiale compatible avec la dimension des grains de speckle enregistrés par une caméra CCD (Fig.1). Lorsque l'objet vibre (10 kHz-10MHz), un système de décalage en fréquence accordable, contrôlé par deux modulateurs acousto-optiques (AOM), permet par compensation de phase, de figer dans le temps les franges d'interfranges, enregistrées par la caméra CCD, pour chacune des composantes de Fourier du spectre de la vibration (Fig. 2).

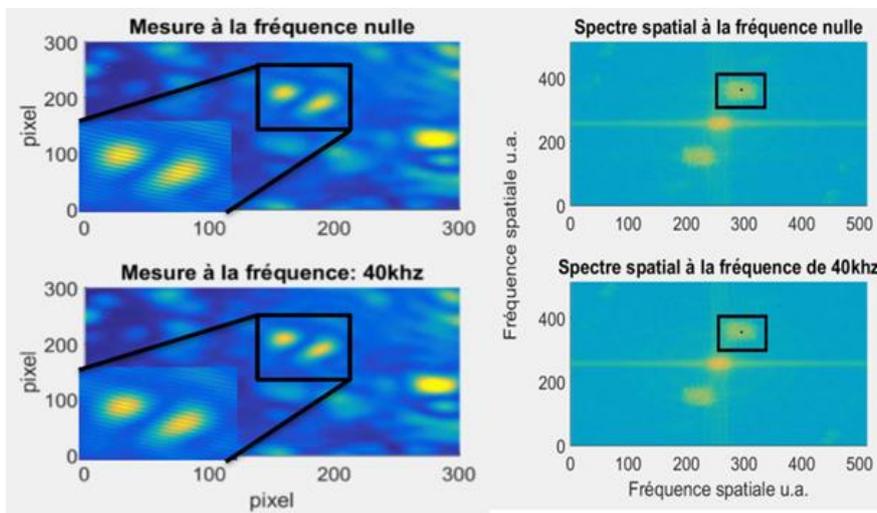


Fig.2) Simulations numériques.

Gauche : Figures d'interférences (et zoom) enregistrées par la caméra CCD pour deux valeurs de la fréquence de décalage.

Droite : Spectres spatiaux des figures d'interférences et zone de filtrage (carré noir) pour l'extraction des composantes de Fourier de la dépendance temporelle de vibration.

Un filtrage spatial de Fourier des figures d'interférences figées dans le temps permet d'accéder à la dépendance spatiale de la phase interférométrique. Cette phase est moyennée temporellement (TF temporelle) par la caméra CCD, dont la bande passante (inversement proportionnelle au temps d'intégration :TI) de l'ordre du kHz est bien inférieure aux fréquences de vibration à détecter. Après filtrage de Fourier on obtient le signal complexe :

$$S(x, y, \Omega_T) = E_R E_S(x, y) \exp[j\Omega_x x] \exp[j\Omega_y y] \exp[j\varphi_s(x, y)] \left\langle \exp[j\Phi(x, y, t)] \exp[j\Omega_T t] \right\rangle_{TI}$$

Avec : $E_S(x, y)$ et $\varphi_s(x, y)$: l'amplitude et la phase du champ de speckle, Ω_x et Ω_y les fréquences spatiales induites par le coin d'air, Ω_T la différence de fréquence temporelle accordable induite par les deux AOM et $\Phi(x, y, t) = [2\pi/\lambda] \times 2d(x, y, t)$ le déphasage spatio-temporel induit par la déformation que l'on souhaite détecter. Ce vibromètre laser de Fourier permet donc d'enregistrer de façon séquentielle les différentes composantes de Fourier d'une surface vibrantes puis de retrouver le déplacement spatio-temporel:

$$d(x, y, t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arg \left(TF^{-1} \left[S(x, y, \Omega_T) \exp[-j\varphi(x, y)] \exp[-j\Omega_x x] \exp[-j\Omega_y y] \right] \right),$$

pour des vibrations stationnaires ou progressives, harmoniques ou transitoires.

3. Conclusion et perspectives :

Ce travail numérique a permis de démontrer la possibilité de mesurer avec une caméra CCD (bande passante inférieure au kHz) des déformations spatiotemporelles rapides (i.e. largement supérieures au kHz). Ces résultats numériques doivent maintenant être confirmés expérimentalement. Ce travail est en cours pour la détection de déformations mécaniques stationnaires ou progressives. La suite de ce projet sera d'utiliser ce vibromètre laser fonctionnant dans le domaine de Fourier pour réaliser un imageur photoacoustique à détection optique.

4. Références

1. Wang L. V. et al, "Photoacoustic Tomography: In Vivo Imaging from Organelles to Organs," Science **335**, 1458 (2012).
2. Beard P. et al, "Biomedical photoacoustic imaging", Interface Focus **1**, 602 (2011)
3. Van der Sanden B. et al, "Vascular bifurcation mapping with photoacoustic microscopy," Biomed. Opt. Express **11**, (2020)
4. Yoshizawa T., ed., Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications (CRC Press, 2009).
5. Horstmann J. et al, "Non-contact Photoacoustic Tomography using holographic full field detection," Proc. SPIE **8800**, 880007 (2013).
6. Gross M., "Heterodyne holography with control of both the signal and reference arms," Appl. Optics **55**, (2016)

(15) Caractérisation des erreurs périodiques d'interféromètres fibrés utilisés pour des mesures de déplacement sub-nanométriques.

Daniel Fiolo, Felix Broneer, François Villar

Mechanical Engineering Group, Instrumentation Service and Development Division,
ESRF-The European Synchrotron, 71 avenue des Martyrs, 38000 Grenoble.

1. Introduction

La mesure de déplacements avec une précision de l'ordre du nanomètre est devenue en enjeu technologique crucial avec la mise à disposition des scientifiques de grands instruments dont les performances, notamment en termes de brillance, permettent des acquisitions extrêmement résolues spatialement. C'est notamment le cas depuis la mise en service de l'EBS-ESRF (*Extremely Brilliant Source - European Synchrotron Radiation Facility*, Grenoble) qui nécessite, par exemple, le développement de systèmes de nanopositionnement d'échantillons, ou bien de mesures angulaires des cristaux des monochromateurs dans des environnements hautement radiatifs et sous vide poussé. La métrologie de ces systèmes bénéficie du récent déploiement commercial d'interféromètres fibrés, que nous nous proposons de comparer sur la base des erreurs périodiques inhérentes à cette technologie.

2. Principe physique et limitations

Notre exposé se limite aux interféromètres fibrés de type Fabry-Pérot, constitués d'une source laser infrarouge, injectée dans une fibre optique connectée à une tête optique après laquelle la lumière se propage dans l'espace libre jusqu'à une cible réfléchissante mobile. La mesure de position est basée sur l'analyse de la figure d'interférence entre le signal réfléchi sur l'extrémité distale de la fibre au niveau de la tête optique (signal de référence) et le signal réfléchi sur la cible. La petite taille des têtes optiques permet de les implémenter dans des systèmes mécaniques encombrés comme c'est souvent le cas dans les dispositifs expérimentaux des lignes de lumières des synchrotrons.

L'information sur la position de la cible est obtenue en calibrant le signal du détecteur autour de la pente maximale de la figure d'interférence¹. Cette méthode limite l'étendue de mesure à quelques nanomètres de déplacement, au cours desquels l'intensité varie linéairement avec le déplacement, et est de toute façon bornée par deux extremums de la figure d'interférence pour fournir un résultat univoque. Afin d'augmenter l'étendue de mesure, il est possible de recourir à une détection en quadrature en modulant la longueur d'onde du laser $\delta\lambda$ à une fréquence donnée, qui induit une variation locale d'intensité δI . La variation de la phase $\delta\Phi$ du signal d'interférence qui en résulte étant proportionnelle à la distance de travail, la démodulation cohérente permet d'évaluer le déplacement de la cible jusqu'à plusieurs mètres d'étendue.

La mesure de déplacement ainsi effectuée souffre cependant de nonlinéarités périodiques dues à la détection en quadrature des réflexions multiples dans la cavité Fabry-Pérot. Ces N réflexions apparaissent dans la figure d'interférence sous forme de termes additionnels de période λ/N et d'amplitude allant jusqu'à plusieurs dizaines de nanomètres, ce qui dégrade considérablement l'exactitude de la mesure de déplacement.

3. Principe de caractérisation des erreurs périodiques²

L'ESRF a mis en œuvre un dispositif de caractérisation des erreurs périodiques d'interféromètres fibrés commerciaux. Il est basé sur la mesure simultanée du déplacement d'un étage mobile par l'interféromètre à caractériser et par un capteur de référence (capteur capacitif). Un actionneur piézoélectrique permet de déplacer l'étage mobile qui supporte un rétrorefléteur à coin de cube du côté du collimateur de l'interféromètre, et une cible métallique du côté du capteur capacitif, permettant la mesure simultanée du déplacement de la cible en respectant le principe d'Abbe (cf. Figure 1).

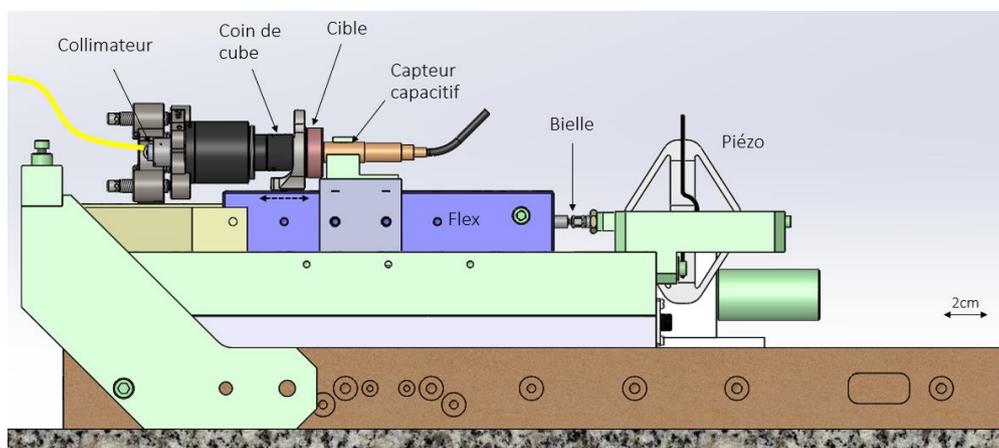


Figure 6. CAO du banc de caractérisation des erreurs périodiques d'un interféromètre fibré.

Afin de minimiser les bruits d'origines diverses (dérive thermique, etc.), le déplacement de l'étage mobile est asservi par la mesure du capteur capacitif. Le nombre d'acquisition moyennées pour chaque distance est optimisé par le minimum de la variance d'Allan. Après soustraction de la régression linéaire, le signal obtenu présente des erreurs résiduelles dont il est possible d'analyser le spectre fréquentiel.

4. Résultats

Les résultats de mesure des erreurs périodiques de deux interféromètres *A* et *B* disponibles dans le commerce sont présentés en Figure 2. Dans cet exemple, l'interféromètre *A* présente des erreurs périodiques d'amplitude ~ 50 nm crête à crête, alors que l'interféromètre *B* n'en présente quasiment pas (Figure 2, gauche). La composante parabolique résiduelle est probablement due aux nonlinéarités du capteur capacitif utilisé comme mesure de référence. Le graphique du centre de la Figure 2 montre une fréquence prépondérante dans le spectre des erreurs résiduelles de l'interféromètre *A*, contrairement à l'interféromètre *B* (Figure 2, droite). Cette fréquence correspondant à une période spatiale de 774 nm est due à la double réflexion dans la cavité de Fabry-Perot du signal de l'interféromètre dont la longueur d'onde de travail est d'environ 1550 nm.

Selon le budget d'erreur de la chaîne de mesure et les spécifications en termes d'exactitude, l'interféromètre *A* sera donc à privilégier par rapport au *B*.

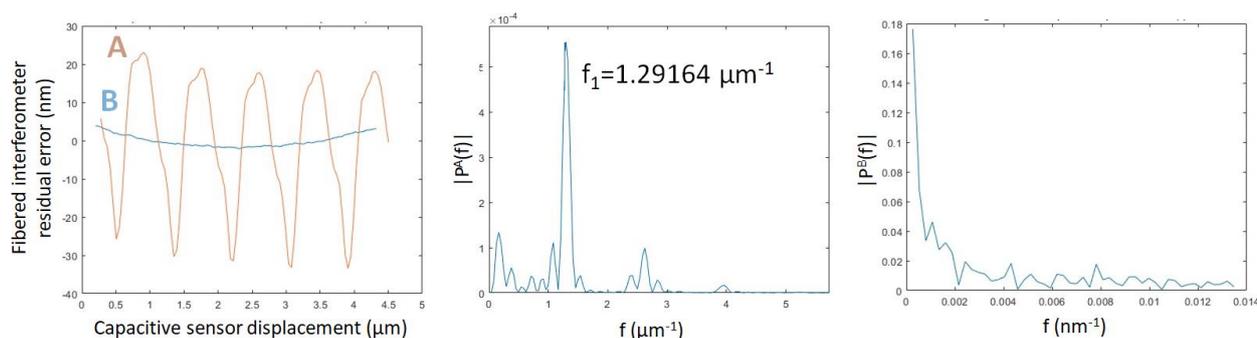


Figure 7. Gauche : Signal résiduel mesuré par deux interféromètres du commerce *A* et *B* après retrait de la régression linéaire. Centre : FFT des erreurs résiduelles de l'interféromètre *A*. Droite : FFT des erreurs résiduelles de l'interféromètre *B*.

5. Références

1. K. THURNER, F. P. QUACQUARELLI, P.-F. BRAUN, C. DAL SAVIO, K. KARRAI, « Fiber-based distance sensing interferometry », *Applied Optics*, Vol. 54, N°10, pp 3051-3063 (2015)
2. J. D. ELLIS, « Field guide to displacement measuring interferometry », *SPIE Field Guide*, Vol. FG30 (2014)

(16) Etat de l'art des méthodes instrumentales de mesure de la salinité absolue de l'eau de mer

Marc Le Menn

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Shom)
13 rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest Cedex 02

1. Introduction : définitions de la salinité et besoins des océanographes

La salinité est une des variables essentielles pour l'étude du climat. Elle permet le calcul de la masse volumique de l'eau de mer, du niveau des océans ou de la vitesse des courants géostrophiques, par l'utilisation des formules des équations thermodynamiques de l'eau de mer de 2010 ou TEOS-10 [1].

Depuis les années 80, les océanographes ont défini leurs besoins en termes d'exactitude et fidélité des mesures, dans un programme appelé WOCE pour World Ocean Circulation Experiments [2]. Pour la salinité, l'exactitude requise est de 0,002 en termes de salinité pratique S_p définie par une échelle appelée PSS-78, et la fidélité de 0,001.

La salinité pratique est sans unité car elle est basée sur un rapport de mesures de conductivité électrique. Elle est obtenue à l'aide d'instruments appelés profileurs CTD pour Conductivity-Temperature-Depth. Or, le TEOS-10 est basé sur la notion de salinité absolue S_A , qui correspond à la masse de toutes les substances dissoutes par kilogramme d'eau de mer. Elle s'exprime en g/kg, ce qui rend les équations du TEOS-10 homogènes. Le problème est qu'à l'heure actuelle, on ne sait mesurer, in situ, que la conductivité électrique de l'eau pour en déduire S_p .

Les techniques acoustiques basées sur la mesure de la vitesse du son, ont des résolutions qui permettent d'approcher 0,001 g/kg, mais concernant les meilleurs appareillages de laboratoire, l'incertitude de leurs mesures est 3 à 6 fois supérieure aux spécifications requises et concernant les instruments utilisés in situ, elle est 60 fois supérieure. Depuis de nombreuses années, des travaux ont été entrepris pour développer des techniques optiques basées sur la mesure de l'indice de réfraction de l'eau. L'indice de réfraction est en relation directe avec la masse volumique et la composition du milieu. L'océan est cependant un milieu agressif et peu propice aux mesures optiques. Malgré cela, de nombreux dispositifs ont été expérimentés ces dernières années. Cette communication propose de faire le point sur ces développements.

2. Relations entre salinité absolue et masse volumique

Le TEOS-10 a adopté 4 définitions différentes de la notion de salinité absolue. Trois d'entre-elles correspondent au matériel dissous dans l'échantillon. La dernière appelée S_A^{dens} , fait le lien avec la masse volumique : « S_A^{dens} est la valeur de la variable salinité de l'expression de la masse volumique du TEOS-10 qui donne la masse volumique de l'échantillon mesuré à $t = 25\text{ °C}$ et $p = 101325\text{ Pa}$ ». S_A^{dens} est appelé salinité absolue ou S_A .

S_A n'étant pas mesurable in situ, le TEOS-10 a prévu une formule de calcul pour l'évaluer :

$$S_A = S_R + \delta S_A \quad (1)$$

avec :

$$S_R \approx \frac{35.16504}{35} S_p \quad (2)$$

δS_A est appelé anomalie de salinité absolue. Des méthodes empiriques basées d'une part sur les concentrations en silicates des différents océans et d'autre part sur l'analyse de la composition d'échantillons en silicates, nitrates, carbone inorganique dissous et alcalinité totale ont été publiées pour estimer δS_A , mais aucune méthode de mesure directe ne permet de le mesurer.

D'autres éléments sont présents dans l'eau de mer à des concentrations qui peuvent avoir de l'influence compte tenu des tolérances requises. On peut citer [3], la matière organique dissoute ou CDOM (0 à 2,5 mg/l en Atlantique), les bactéries dont les espèces et les concentrations sont mal connues, les microbes (100 milliards de virus/l d'eau de mer), les CFC (chlorofluorocarbène), les HPA (hydrocarbures polycycliques aromatiques), les matières minérales ou organiques en suspension (0 à 100 mg/l) ou les micro-plastiques.

Quand la salinité augmente de 0 à 40 g/kg, la masse volumique ρ^{SW} n'augmente que de 3 %. Il est donc nécessaire de la mesurer avec une incertitude relative meilleure que 1.10^{-6} pour pouvoir suivre des variations de salinité au 10^{-3} près. Seules quelques techniques de laboratoire sont capables d'atteindre ces performances. La principale est celle du densitomètre à tube vibrant avec la méthode dite de substitution permettant de contrôler la dérive à court terme de l'instrument. Cette technique est cependant couteuse en temps (20 h / échantillon) et son incertitude augmente rapidement si les mesures doivent se faire en pression [4]. En 2018 elle a permis d'établir une relation répondant aux besoins océanographiques, à pression atmosphérique :

$$\rho^{SW} = \rho_0^{H2O} + \Delta\rho_0^{SW} + \Delta\rho_A^{SW} \quad (3)$$

où ρ_0^{H2O} est la masse volumique de l'eau pure dégazée, $\Delta\rho_0^{SW}$ la variation de densité lié aux sels dissous et $\Delta\rho_A^{SW}$ la variation due à l'air absorbé. Ces éléments sont décrits dans la publication [5]. L'incertitude type obtenue est de 2 g/m^3 à la pression atmosphérique et 34 g/m^3 jusqu'à 65 MPa.

D'autres méthodes de laboratoire existent comme les pycnomètres qui mettent en œuvre la définition de la masse volumique (incertitude $\approx 0.12 \text{ kg/m}^3$ de 0 à 110 MPa), ou la pesée hydrostatique (incertitude élargie $\approx 4 \text{ g/m}^3$ à la pression atmosphérique). Pour travailler en pression, le flotteur doit être équipé d'une suspension magnétique, ce qui augmente l'incertitude à 15 - 20 g/m^3 [3]. La meilleure détermination de ρ^{SW} a été faite au Japon en 2012 [6] par pesée hydrostatique, avec une méthode à double flotteur pour contrôler les effets de couplage magnétique durant la lévitation, les flotteurs étant constitués d'un monocristal de silicium et germanium. La fidélité de leurs mesures est meilleure que 1 ppm soit 1 g/m^3 .

3. Techniques optiques : intérêts et problèmes posés.

L'indice de réfraction optique n est en relation avec la masse volumique et la quantité de matières dissoutes par la relation dite de Lorentz-Lorenz. Des formules empiriques ont été déduites de cette relation, permettant de relier n à ρ_0^{H2O} à la température t et à la longueur d'onde λ [7]. Elle a été utilisée aussi pour quantifier les propriétés de diffusion de l'eau à partir de sa dérivée par rapport à ρ_0^{H2O} .

Pour l'eau de mer, plusieurs auteurs ont établi des relations empiriques permettant de calculer n . La plus complète est celle de Millard et Seaver [8]. Elle couvre les gammes 500 à 700 nm pour λ , 0 à 30 °C pour t , 0 à 40 pour S_p et 0 à 11000 dbar pour p . Son incertitude type est estimée à 0,4 ppm pour l'eau pure à pression atmosphérique et 80 ppm pour l'eau de mer dans la gamme de pression.

Cette relation permet de mettre en évidence la faible sensibilité des variations d'indice à la salinité : $\delta n / \delta S_A = -1.4 \times 10^{-4} (\text{g kg}^{-1})^{-1}$ entre 0 et 35 g kg^{-1} , ce qui oblige à mesurer n avec une grande résolution pour répondre aux besoins des océanographes. Une résolution de 1.10^{-7} sur n , donne une résolution de 0,6 mg/kg sur S_A . Cette résolution doit être conservée sur une gamme allant de 1,329 à 1,348.

L'eau de mer est également diversement chargée en particules et la question se pose de leur effet sur n . Une publication sortie en 2017 [9] et une autre en 2021 [10], ont montré que « le changement de turbidité d'un liquide de presque transparent à très opaque, laissait inchangé sur presque deux ordres de grandeur d'amplitude de diffusion, le libre parcours moyen d'une lumière incidente isotropique », ce qui signifie que la turbidité a un impact réduit sur la mesure de l'indice de réfraction du milieu et qu'il reflète son contenu dissous. Elle a par contre un impact sur l'amplitude et la forme gaussienne des faisceaux, rendant possible par ce biais, l'évaluation de la turbidité avec un seul faisceau [11].

4. Les développements instrumentaux

Les techniques de réfractométrie ont été parmi les premières à être utilisées pour mesurer l'indice de réfraction de l'eau de mer en laboratoire ou in situ. Concernant les instruments destinés aux mesures in situ, on peut citer le réfractomètre à fibre optique basé sur le principe de l'incidence rasante, publié en 1988 par Mahrt et Waldman [12]. Cet instrument de petite taille, permettait d'échantillonner le milieu à 1 kHz avec une fidélité de 1.10^{-6} sur n . L'incidence rasante présente cependant l'inconvénient de réaliser la mesure dans la couche limite thermique du prisme entraînant de grosses erreurs de mesure durant la traversée de gradients thermiques. Ce problème a été résolu

par la réalisation d'un instrument appelé NOSS, testé en mer en 2010 [13]. Néanmoins, des problèmes de tenue à la pression et de réduction en taille de cet instrument pour son embarquement sur des flotteurs dérivants, empêchent à ce jour sa commercialisation.

Un progrès important a été effectué en 2022 par une équipe chinoise [14]. Utilisant le principe de la réflexion totale, elle est parvenue à développer un composant monolithique où un prisme en Saphir est déposé sur une couche de n-GaN. Avec une répétabilité de bonne qualité, une résolution de 1.10^{-3} en salinité et une solution trouvée pour protéger l'ensemble du bio-fouling, cette réalisation constitue probablement une avancée majeure pour la mesure de la salinité. Elle reste cependant à tester in situ.

Différents procédés interférométriques ont également été testés, reprenant les structures à deux ondes du type Mach-Zehnder ou Jamin. La structure à ondes multiples du type Fabry-Perot [15] a été utilisée en 1971 pour mesurer l'effet de la pression sur n et obtenir des valeurs reprises par la suite pour construire l'algorithme de Millard et Seaver [8]. Plus récemment, un composant monolithique composé d'un interféromètre à fente d'Young et d'un guide d'onde a été construit et testé en laboratoire. Le plus petit décalage de phase mesuré avec cet instrument correspond à une résolution proche de 1.10^{-6} sur n [16].

Outre ces techniques 'classiques', un grand nombre de développements ont été faits à l'aide de fibres optiques. Les techniques des réseaux de Bragg fibrés (RBF) et des réseaux de Bragg fibrés longue période (RBF-LP) ont fait l'objet de nombreuses expérimentations dans les années 2000 mais aucune n'est arrivée à atteindre la résolution et la gamme de variation requises. Des laboratoires chinois ont cependant poursuivi des études avec des dispositifs fibrés et publié abondamment sur le sujet. L'une d'elles porte sur la résonance plasmonique de surface. Si sous une forme classique elle ne répond pas au critère de sensibilité nécessaire, sous la forme d'un capteur utilisant des principes d'optique quantique elle semble plus prometteuse [17]. Une source à simple photon excite une surface recouverte d'un plasma de polaritons, à l'interface entre un dépôt d'or et l'eau de mer. L'utilisation d'une méthode d'analyse statistique permet d'atteindre une résolution de $0,0016 \text{ g kg}^{-1}$.

Le développement le plus prometteur semble toutefois venir des USA avec un brevet déposé en 2016 pour un système reposant sur deux fibres optiques fusionnées sur 1 cm [18]. Leur revêtement en plastique ayant été enlevé, la partie soudée est en contact avec l'eau de mer. Le système est interrogé par une source à 16 longueurs d'ondes, créant un interféromètre à ondes multiples. L'extrême sensibilité du dispositif permet une résolution de 7.10^{-5} kg/m^3 sur ρ^{SW} .

5. Conclusion

L'océan est un milieu difficile à conquérir pour les instruments de mesure optique. Les tolérances requises en matière de mesure de la salinité ajoutent de la complexité. De nombreux dispositifs ont déjà été testés et il semble difficile d'innover. L'innovation ne pourra venir que de l'association de laboratoires spécialisés en optique intégrée ou en dispositifs fibrés très complexes, avec des laboratoires spécialisés en métrologie océanographique.

6. Références

1. IOC, SCOR and IAPSO, "The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties", Intergovernmental oceanographic Commission, *Manuals Guides n° 56*, UNESCO (English), 196 pp (2010).
2. T. M. Joyce, "WHP Operations and Methods. Introduction to the collection of expert reports compiled for the WHP Programme", July 1991.
3. M. Le Menn, P. A. G. Albo, S. Lago, R. Romeo, and F. Sparasci, "The absolute salinity of seawater and its measurands", *Metrologia*, 56, 1 (2019). <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaea92>
4. H. Schmidt, H. Wolf, E. Hassel, "A method to measure the density of seawater accurately to the level of 10^{-6} ", *Metrologia* 53, 770 (2016). doi:10.1088/0026-1394/53/2/770
5. H. Schmidt, S. Seitz, E. Hassel, and H. Wolf, "The density-salinity relation of standard seawater", *Ocean Science*, 14, 15-40 (2018). <https://doi.org/10.5194/os-14-15-2018>

6. Y. Kayukawa, Y. Kano, K. Fujii, and H. Sato, 'Absolute density measurements by dual sinker magnetic levitation densimeter', *Metrologia* 49, 513–521 (2012). doi:10.1088/0026-1394/49/4/513
7. A. H. Harvey, J. S. Gallagher, J. M. H. Levelt Sengers, 'Revised Formulation for the Refractive Index of Water and Steam as a Function of Wavelength, Temperature and Density', *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 27, 4, 761-774, (1998). <https://doi.org/10.1063/1.556029>
8. R.C. Millard, G. Seaver, 'An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density and wavelength', *Deep-Sea Res.*, Vol. 37, 12, 1909-1926, (1990). [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(90\)90086-B](https://doi.org/10.1016/0198-0149(90)90086-B)
9. R. Savo, R. Pierrat, U. Najar, R. Carminati, S. Rotter, S. Gigan, 'Observation of mean path length invariance in light-scattering media', *Science*, 10 Nov 2017: Vol. 358, Issue 6364, pp. 765-768. [https://DOI: 10.1126/science.aan4054](https://DOI:10.1126/science.aan4054)
10. M. Davy, Kühmayer, S. Gigan, S. Rotter, 'Mean path length invariance in wave-scattering beyond the diffusive regime'. *Communications Physics, Nature Research*, 4 (1), (2021). <https://DOI:10.1038/s42005-021-00585-5>.
11. B. Hou, P. Grosso, J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Le Menn, 'Principle and implementations of a refracto-nephelo-turbidimeter for seawater measurements', *Optical Engineering* 52(4), 044402, (2013).
12. K.-H. Mahrt and H.-C. Waldmann, 'Field proven high-speed micro optical profiler sampling 1000 times per second with 10^{-6} precision', *OCEANS '88, IEEE Publ. No. 88-CH 2585-8*, Baltimore, MD, USA, Volume 2 (4), 497 ... 504, (1988).
13. M. Le Menn, J. L. De Bougrenet de La Tocnaye, P. Grosso, L. Delauney, C. Podeur, P. Brault, and O. Guillaume, 'Advances in measuring ocean salinity with an optical sensor', *Measurement Science & Technology*, 22 (115202), (2011). <https://doi:10.1088/0957-0233/22/11/115202>
14. J. Jing, Y. Hou, Y. Luo, L. Chen, L. Ma, Y. Lin, K. H. Li, and Z. Chu, 'Chip-scale in-situ salinity sensing based on a monolithic optoelectronic chip', *ACS Sensors*, 7, 3, 849–855, (2022). <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c02616>
15. Stanley, E. M., 'The refractive index of seawater as a function of temperature, pressure and two wavelengths', *Deep-sea Research*, 18, pp833-840, (1970).
16. Ahmadi, L., Hiltunen, M., Stenberg, P., Hiltunen, J., Aikio, S., Roussey, M., Saarinen, J., and Honkanen, S., 'Hybrid layered polymer slot waveguide Young interferometer', *Optics Express*, 24, 10, 10275, (2016). DOI:10.1364/OE.24.010275
17. Zhao, Y., Peng, Y., Hu, X., Xia, F., Zhao, Q., 'Beating the shot-noise limit with optical fiber quantum sensors for salinity measurement', *Sensors and Actuators B: Chemical*, 320, 128353, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128353>
18. Kapit, J. A., Farr, N. E., Schmitt, R. W., 'N-wavelength interrogation system and method for multiple wavelength interferometers', *U. S. Patent*, n° US 9,441,947, B2, (2016).

(17) Evolution of seismic technologies for oil exploration and new energy: potential applications to other domains

Nick Moldoveanu, Clément Kostov⁽¹⁾, Maurice Nessim⁽²⁾

Independent Geophysical Consultant, Nice, France

(1) Independent Geophysicist, Guyancourt, France

(2) Cloud Stream Medical Imaging, Inc

1999 Bryan St Ste 900, Dallas, TX, 75201, USA

1. Introduction

Geophysical imaging techniques have played a key role since the 1930's assisting geologists and engineers in finding and producing oil and gas from subsurface reservoirs located at depths of few hundred meters to a few kilometers.

Among the geophysical techniques, reflection seismic surveys have been overwhelmingly the method of choice for detecting and characterizing hydrocarbon reservoirs. Over several decades, the industry has developed specialized equipment and methods for data acquisition and processing in order to solve complex business problems. Nowadays, datasets with similar characteristics are becoming available in several other application domains – i.e., seismology, near-surface imaging, medical imaging. Such trends in data acquisition, in data processing, and in imaging create the conditions for fruitful knowledge-transfers between diverse application domains, not only at the level of particular components be it hardware or algorithms, but also in terms of the workflows for addressing complex business challenges.

2. Current status of seismic exploration in the energy industries

The imaging targets in hydrocarbon exploration are often covered by complex overburdens, such as salt bodies, located in-between the source and receivers at the earth surface and the targets below the overburdens (see Figure 1). The overall technical goals for seismic surveys include gaining knowledge of the location and composition of the hydrocarbon reservoirs for assessment and/or for monitoring over time. Industry-size seismic surveys are also used as part of CO₂ sequestration projects, for the placement of offshore windfarms, for geothermal developments projects.

In marine environments, efficient towed-streamers acquisitions were developed, whereby the seismic data acquired by one or several vessels towing source arrays and/or receiver arrays, with receivers located along one or several streamers, forming receiver arrays with a large surface footprint (of the order of 1 km by 8 km). The receivers may record pressure only, or pressure and particle movement. In the Gulf of Mexico, a major world basin and a cradle for technological developments, several generations of towed-streamer technologies were used to acquire seismic data: first for imaging of 2D (two dimensional) vertical slices, later for imaging of 3D (three dimensional) volumes progressively improving the image quality by improving the spatial sampling of the data through acquisitions with narrow azimuth, wide azimuth and full azimuth surveys (Moldoveanu et al., 2017). In further pursuit of efficiency gains in both marine and onshore environments, we note the use of simultaneous sources technology.

To achieve more complete and accurate characterization of the targets, data acquisitions with nodes located on the ocean bottom were introduced. In onshore survey, densely deployed nodes allow unprecedented quality of noise attenuation and correspondingly improvements in image quality.

Remarkable progress was made also in signal processing and imaging, with compute-intensive methods such as Full Waveform Inversion and Least Square Reverse Time Migration becoming standard methods in the industry. Compressive sensing concepts, cloud computing, machine learning are further examples of recent technologies that are being adopted in industry projects.

Large-scale simulation of seismic data and of acquisition and processing scenarios has become a very important component of the imaging technology in industry. Simulations help with the development of new technologies, with the design of surveys and project plans that meet complex business requirements, with integrating all the components of a project.

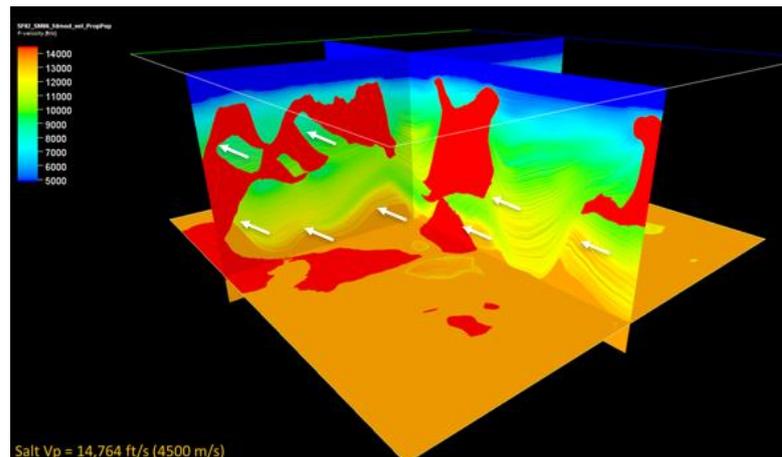


Figure 1. Example of Gulf of Mexico subsurface geology with salt overburden; the small white arrows show where oil reservoirs could exist. Due to their high velocity, salt bodies are plotted in red; notice their complex shapes.

3. Potential applications to other domains

We illustrate potential applications of seismic technologies developed in the hydrocarbon industry with two examples from our experience; in archeology and in medical imaging.

A recent geophysical investigation of buried structures in the Valley of the Kings (Egypt) followed standard geophysical approaches yet did not lead to any new discoveries (Porceli et al., 2020). Our modelling studies show potential for High resolution 3D multicomponent seismic acquisition followed by diffraction imaging. This approach developed in industry may deliver results in a challenging environment where traditional geophysical methods are not succeeding.

Ultrasound medical imaging is another domain that could benefit from advancements in seismic exploration, although the scale of the measurements is different. Most common ultrasound investigations are based on “2D type of acquisition geometries” using linear or curved probes. Designing new 3D probes for ultrasound imaging based on compressive sensing and using the advanced imaging methods that are used in seismic could be beneficial for improvements the results of ultrasound imaging in real time (Guash et al., 2020, Peng and Nessim, 2022).

4. References

1. L. GUASH, O. CALDERON AGUDO, M.-X. TANG, M. WARNER, P. NACHEV, « Full-waveform inversion of transmitted ultrasound image to the human brain », Society of Exploration Geophysicists, Annual Meeting Expanded Abstracts, pp 3887-3891, (2020)
2. N. MOLDOVEANU, C. CUNNELL, F. LE DIAGON, J. C. MATHESON, « New seismic acquisition technology for subsalt and pre-salt oil exploration », 15th International Congress of Brazilian Geophysical & EXPOGEF, Expanded Abstracts (2017)
3. F. PORCELI, 2020, « Integrated Geophysics and Geomatics survey in the Valley of the Kings », Sensors, Vol. 20, N°6, pp 1552-1577, (2020)
4. C. PENG, M. NESSIM, « From exploration to diagnosis: Can geophysicists revolutionize the health care? », Second International Meeting for Applied Geoscience and Energy, Expanded Abstracts, pp 3694-3698, (2022)
5. P.A. WITTE, M. LOUBOUTIN, H. MODZELEWSKI, C. JONES, J. SELVAGE, F.J. HERRMANN, « Event-driven workflows for large-scale seismic imaging in the cloud », Society of Exploration Geophysicists, Annual Meeting Expanded Abstracts, pp 3984-3988, (2019)

(18) Les défis de l'évaluation de la qualité des produits d'humidité du sol dérivés des observations du satellite SMOS à partir de mesures in-situ

François Gibon, Arnaud Mialon, Philippe Richaume, Yann H. Kerr

francois.gibon@univ-tlse3.fr, arnaud.mialon@univ-tlse3.fr, philippe.richaume@cesbio.cnes.fr, yann.kerr@cesbio.cnes.fr
Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, CESBIO (CNRS/UPS/IRD/CNES/INRA), Toulouse

1. Objectif de la présentation

L'objectif de cette présentation est d'illustrer les recherches actuelles liées à l'évaluation de la qualité des données d'humidité du sol dérivées d'observation du satellite SMOS.

2. Pourquoi et comment estimer l'humidité du sol à grande échelle ?

L'humidité du sol, quantité d'eau dans la couche superficielle de sol, est une variable clé du bilan hydrique et énergétique à l'interface sol-atmosphère [1]. Son observation et son suivi sont impliqués dans de nombreux domaines scientifiques et opérationnels tels que le diagnostic du changement climatique et la climatologie [2], les applications agricoles [3] ou encore les prévisions météorologiques. Il est ainsi crucial d'estimer avec précision l'humidité du sol de surface à l'échelle mondiale en tenant compte des incertitudes. Il existe plusieurs méthodes pour estimer la teneur en eau du sol, parmi laquelle la mesure in-situ, la modélisation numérique ou encore les observations de la Terre par satellite.

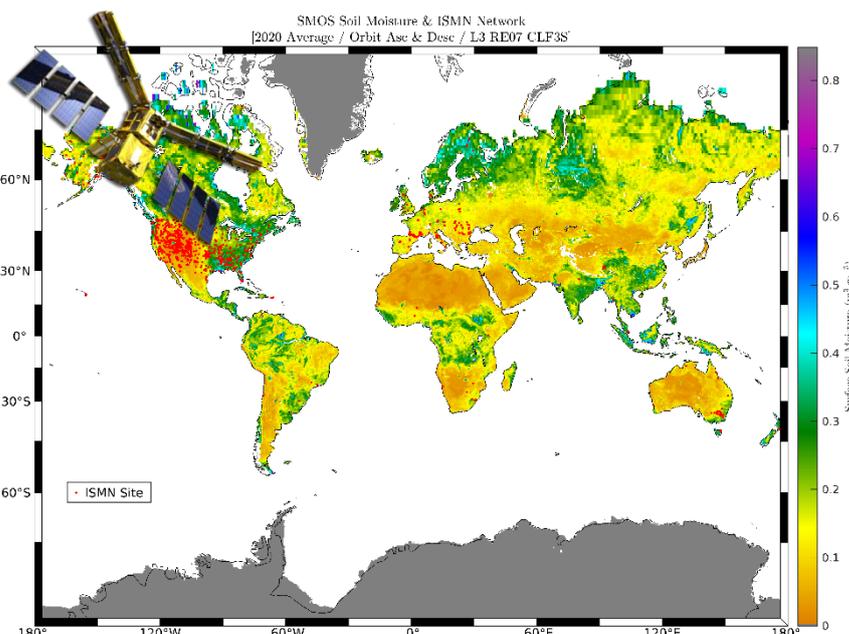


Figure 1. Moyenne de l'humidité du sol pour l'année 2020 ; les points rouges correspondent à la localisation des sondes in-situ du réseau ISMN - adapté de Gibon et al. 2022 (in review)

La mission SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) de l'ESA, lancée en 2009, a été la première mission satellite spécifiquement dédiée pour fournir des cartes globales d'humidité du sol [4] avec une précision de $0.04 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ dans des conditions de faibles couvert végétal ($<5 \text{ kg}.\text{m}^{-2}$) et dans des régions relativement homogènes. Basé sur un radiomètre interférométrique en bande L (1.4GHz), le satellite mesure des températures de brillance selon différents angles d'incidence avec une résolution spatiale allant de 27 à 55 km ($\sim 43 \text{ km}$ en moyenne) et une couverture globale de trois jours. À partir de ces observations, un modèle permet de retrouver des paramètres de surface tels que la couverture de végétation ou encore l'humidité du sol (Cf. Figure 1).

3. Les défis de l'évaluation de la qualité des données SMOS

La méthode classiquement utilisée pour évaluer la qualité des données satellite consiste à comparer les données issues du satellite avec une référence afin d'en quantifier les différences, et ainsi d'en déduire une incertitude. Cependant, dans le cas présent, cette opération soulève plusieurs problématiques :

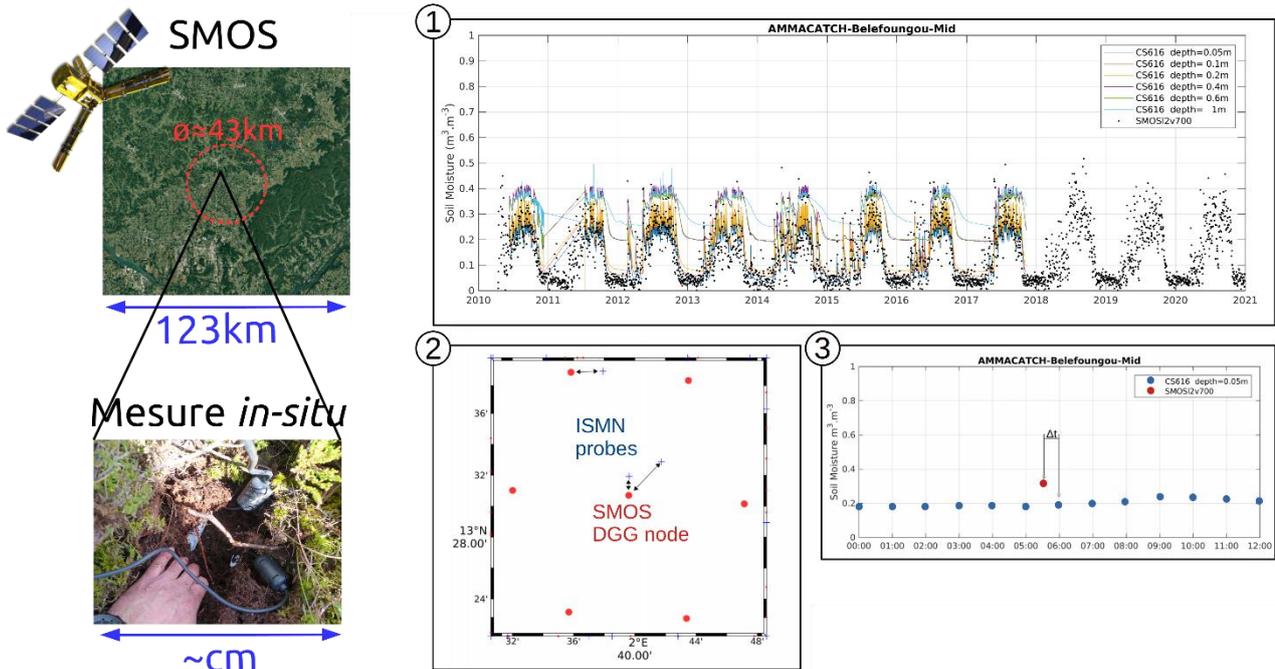
- Quelle référence utiliser ?

Une solution souvent utilisée est l'utilisation de données issues de mesures in-situ comme référence, de diverses technologies, directement installées dans le sol (Cf. partie gauche de la Figure 2). Cependant, plusieurs éléments doivent être pris en considération lors de leur utilisation en tant que référence. Tout d'abord, la qualité de l'installation des sondes dans le sol, la profondeur ou encore leur étalonnage joue un rôle important sur l'incertitude associée

à leur mesure. De plus, la question de la différence d'échelle de la représentativité spatiale entre les sondes ($\sim\text{cm}^2$) et le satellite ($\sim 10^3 \text{ km}^2$) pose des questions d'ordre méthodologique (Cf. partie gauche de la Figure 2). Enfin, malgré les efforts depuis 2009 de l'International Soil Moisture Network (ISMN), pour centraliser les mesures in-situ issues de stations installées sur Terre, leur nombre et répartition reste assez inégale (Cf. points rouges Figure 1) et ne couvre donc pas toutes les conditions de surface. Or, la qualité de l'estimation de l'humidité du sol faite par le processeur de SMOS est dépendante de la configuration des conditions de surface dans le champ de vue (végétation, type de sol, topographie, ...).

- Quelle méthodologie appliquer ?

Afin de quantifier la qualité des données, plusieurs métriques statistiques sont utilisées pour différents types d'incertitudes : systématique, aléatoire, cohérence temporelle, ... Cependant, ces dernières peuvent être influencé par les différentes stratégies de collocation spatiale et



temporelle entre les 2 jeux de données à comparer (Cf. les encarts ② et ③ de la Figure 2).

Figure 2. A gauche : illustration de la problématique d'échelle spatiale entre le satellite et la sonde ; à droite : ① en noir une série temporelle SMOS, en couleur les sondes les plus proches à différentes profondeurs ; ② stratégie de collocation spatiale du plus proche voisin entre les sondes et SMOS ; ③ stratégie de collocation temporelle au plus proche voisin entre une donnée SMOS en rouge et in-situ en bleu - adapté de Gibon et al. 2022 (in review)

4. Références

1. S. I. Seneviratne et al., "Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review," *Earth-Science Reviews*, vol. 99, no. 3, pp. 125–161, 2010, issn: 0012-8252. doi:479 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
2. H. Douville and F. Chauvin, "Relevance of soil moisture for seasonal climate predictions: A preliminary study," *Climate Dynamics*, vol. 16, no. 10, pp. 719–736, 2000
3. J. D. Bolten, W. T. Crow, X. Zhan, T. J. Jackson, and C. A. Reynolds, "Evaluating the utility of remotely sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 3, 488 no. 1, pp. 57–66, 2010. doi: 10.1109/JSTARS.2009.2037163
4. Y. H. Kerr, P. Waldteufel, J.-P. Wigneron, J. Martinuzzi, J. Font, and M. Berger, "Soil moisture retrieval from space: The soil moisture and ocean salinity (smos) mission," *IEEE transactions on Geoscience and remote sensing*, vol. 39, no. 8, pp. 1729–1735, 2001. doi: 10.1109/36.506 942551.

(19) Toward the submillimeter spectroscopy of the volatile metabolome emitted by the soil microorganisms

Daria Gudź¹, François Bondu¹, Françoise Binet², Ludovic Frein¹, Cyril Hamel¹, Anthony Carré¹, Steve Bouhier¹

¹Institut FOTON - UMR CNRS 6082, Univ Rennes, CNRS, Rennes

²ECOBIO - UMR CNRS 6553 Univ Rennes, CNRS, Rennes

1. Introduction

A metabolome is a collection of all organic compounds that are naturally produced as a result of an organism's metabolic activity in a given biological sample. These compounds are volatile: they have high vapor pressure at high temperatures. Thus, the object of our research is the volatile organic compounds (VOCs) originating from the soil microbiological community. The soil is the main reservoir of microorganisms on earth that contains a huge diversity of bacteria and fungi (e.g., 10^{18} estimated strains, 10^{6-9} bacterial cells per gram of soil). Soil microorganisms exhibit impressive flexibility and adaptability to their metabolism; thus, they are the source of a high variety of VOCs. The VOCs spectrum is called the microbial volatile spectrum. To date, less than 10% of single microbial VOCs are associated with a function [1], which makes it difficult to manipulate the soil at the microbial level for agriculture as well as to estimate the contribution of soil activity to atmospheric chemistry. Therefore, there is a need to continue discovering the wealth of soil content.

Currently, volatiles can be unveiled by chromatography associated with mass spectrometry [3]. However, this requires high temperatures to fragment molecules; this entails a reconstruction process with an uncertainty of the input molecular material [4]. Proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR-MS) also produces molecular fragments, although it is characterized by high sensitivity (at the ppt level). Submillimeter spectroscopy is a promising tool because it offers high specificity and protects molecular integrity.

The energy levels of terahertz waves match the energy levels of low-frequency vibrations and rotations of biomolecules very well. This makes absorption spectroscopy in the THz range (usually defined as 0.3 – 10 THz and from 1 mm to 30 μm in wavelength) an accurate tool for detecting and identifying specific signatures of microbial metabolism. We hypothesize that any change in the measured VOCs spectrum reflects changes in the soil microbial metabolism. Thus, our objective is to link the molecular composition and concentration information retrieved from an absorption spectrum with the diversity and abundance of the present microorganisms, as studied by metagenomics [2]. Second, we have the potential to trace the population time evolution of the microorganisms in a sample. This also provides a path for discussing the relationship between microbial soil diversity and soil ecological functions.

To implement submillimeter spectroscopy of a gaseous sample, one needs a submillimeter wave source, an antenna for emission in free space, a gas cell, and a detection system. The ideal source for molecular spectroscopy is easily tunable in a wide frequency waveband, operates at low-amplitude noise, and is accessible to users. Currently, existing THz sources impose limitations on spectroscopy, such as a limited tuning range (tens of GHz), costly instrumentation, and low-frequency resolution, which are crucial in discriminating absorption lines [5]. To overcome these constraints, we propose an optical photomixing technique.

2. Frequency synthesizer

The photomixing technique involves mixing two laser frequencies that are focused onto a photomixer device. Further, the resulting beat note is converted into a continuous THz wave and emitted in free space. The proposed architecture of the instrument is shown on the right side of Figure 1. Its dimensions allow it to be portable. The submillimeter wave synthesizer source is based on three commercial fibered distributed feedback laser diodes (DFB) at a wavelength of 1.5 μm . The beat note shift performance is achieved owing to the locking of the DFB1 and DFB2 lasers with the Fabry-Perot cavity resonances (free spectral range (FSR) is 1 GHz) by employing the Pound-Drever-Hall technique [6]. Thus, the frequency difference between these two lasers is a

multiple of the FSR. The DFB2 and DFB3 lasers are locked with a phase-locking loop system, thus making it possible to obtain 5-10 GHz of a frequency difference between them. Hence, the tunability of a beat note between the DFB1 and DFB3 lasers in the range of 100-850 GHz can be achieved. Furthermore, we achieved an amplitude noise power spectral density of -134 dBc/Hz at 10^3 Hz.

If a spectroscopy measurement is conducted with a gas sample at low pressure (< 1 mbar), the absorption line carries only Doppler thermal broadening. The Doppler linewidth of these lines is in the range of several hundreds of kHz and is proportional to the central frequency of a line. Thus, it is highly desirable to have the precision of the beat note synthesis of the order of the Doppler effect. Here, precision implies the beat-note variation with time. Further, we call this a beat note shift.

3. Beat note thermal stabilisation

We estimated that the important contribution to the beat-note shift comes from the thermal sensitivity of the Fabry-Perot cavity. This phenomenon affects the reflectivity of the mirrors and the FSR may vary over time, producing a shift. Therefore, temperature control of the cavity is required. We implemented its thermal stabilization by enclosing it in a copper box whose temperature is controlled by a servo loop to maintain the set temperature. In this manner, we want to reduce the interaction between the cavity and ambient temperature.

To verify the sensitivity of the beat note, we set the beat note at 18.62 GHz and were measuring its shift over 12 hours, while artificially creating the ambient temperature changes in our laboratory room with a heater (see Figure 1 on the left). Thanks to the thermal insulation of the Fabry-Perot cavity, we have reached the beat note shift to 42 kHz/K.

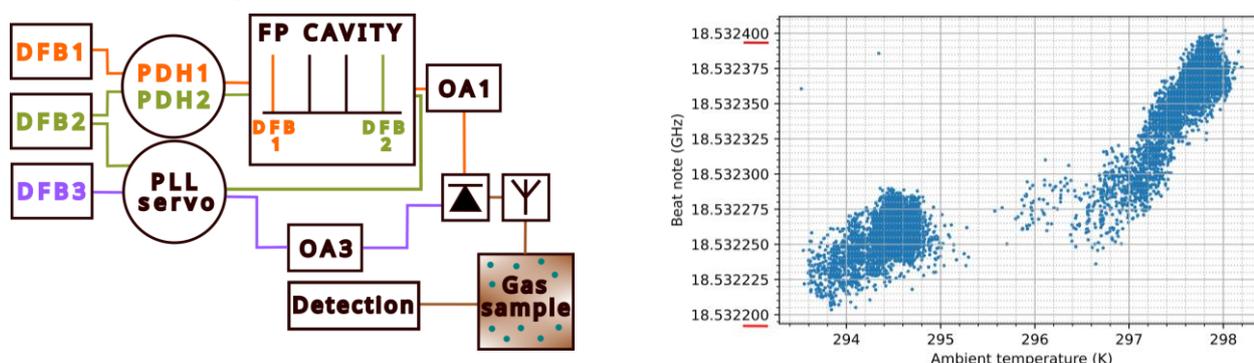


Figure 1. (right) Principal scheme of the fibered submillimeter spectroscopy instrument. FB - Fabry-Perot; OA- optical amplifier. (left) Beat note measurements as a function of the ambient temperature.

By interpolation, the beat note at 100 GHz should exhibit a shift of approximately 170 kHz/K. According to spectroscopic databases, it is already sufficient to detect many C-(N)-(O) molecules such as phenol, glycolic acid, furan, ethanethiol, and many others.

4. Références

1. BROWN, R. W., BULL, I. D., JOURNEAUX, T., CHADWICK, D. R. & JONES, D. L., "Volatile organic compounds (VOCs) allow sensitive differentiation of biological soil quality", *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 156, pp 108187 (2021)
2. cccc
3. KAI ZHANG, L. Z., "Volatile Organic Compounds as Novel Markers for the Detection of Bacterial Infections", *Clinical Microbiology*, Vol.3, (2014)
4. BLAŽENović, I., "Comprehensive comparison of in silico MS/MS fragmentation tools of the CASMI contest: database boosting is needed to achieve 93% accuracy", *Journal of Cheminformatics*, Vol. 9 (2017)
5. TONOUCI, M., "Cutting-edge terahertz technology", *Nature Photon*, Vol.1, pp 97–105 (2007)
6. A. HALLAL, STEVE BOUHIER, F. BONDU, "Synthesis of a 30-Hz Linewidth Wave Tunable Over 500 GHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, pp 1367-1371 (2017)

(20) Ultra-sensitive Water Isotope Spectrometer for Atmospheric Measurements on-board a Passenger Airplane

Markus Miltner^(1,2,3), Andreas Zahn⁽²⁾, Erik Kerstel⁽¹⁾

(1) Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy)
140 rue de la Physique, 38402 Saint Martin d'Hères, France

(2) Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

IMK-ASF, Institute of Meteorology and Climate Research, Postbox 3640, 76021 Karlsruhe, Germany

(3) AP2E, Durag Group

240, rue Louis de Broglie, Les Méridiens Bâtiment A, CS90537, F-13593 Aix-en-Provence, France

1. IAGOS-CARIBIC: A flying laboratory for global atmosphere monitoring

IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System) is a European Research Infrastructure that uses regular passenger aircraft to carry scientific instrumentation to sample the atmospheric composition up to 12 km altitude. In IAGOS-CARIBIC (Civil Aircraft for the **R**egular **I**nvestigation of the **A**tmosphere **B**ased on an **I**nstrument **C**ontainer), a container equipped with ~20 scientific instruments is installed on a modified Airbus A350 by Lufthansa during several consecutive long-haul flights from Europe to many destinations worldwide. With roughly 12 installations per year, this flying laboratory provides data with high spatial and temporal resolution of ~100 trace gases, aerosols and cloud parameters, and this over several years/decades. Thereby it allows the validation of climate models and satellite observations.

2. Water in the Earth's atmosphere

There are two main aspects that render H₂O the most important molecule in our atmosphere: 1) Via its large enthalpy change associated with evaporation and condensation, water contributes to the energy distribution over the planet in the form of latent heat. 2) In the form of water vapor and clouds, water is responsible for ~75% of the Earth's greenhouse effect. This contribution is partly caused by feedback effects driven by the non-condensable greenhouse agents, foremost CO₂ [1]. These highly complex feedback effects are the reason why clouds are the major unknown in today's climate models [2]. Since all these water-involving processes are isotope-dependent, water isotope ratios are an ideal tracer to help quantify and disentangle them. Water isotope ratios reflect the evaporation and condensation history of an air parcel and thus enable the identification of different air masses and the following of their mixing. Furthermore, the number of isotope-enabled climate models increases and isotope measurements thus represent a means to validate them.

3. CHISA: CARIBIC H₂O ISotope Analyzer

In a cooperative effort, LIPhy, KIT and AP2E are developing the next generation water isotope spectrometer for the CARIBIC instrument set. The different stable water isotopes H₂¹⁶O, H₂¹⁸O and HDO show different absorption lines in the near infrared and can thus be analyzed using spectroscopic techniques. Since the rare isotopes are so little abundant, the atmospheric water concentration at flight altitude is very low, and isotope fractionation effects are on the order of several permil only, we use the highly sensitive OFCEAS technique, that has already proven its capacity to make similar measurements [3]. In fact, we adapt two OFCEAS spectrometers to the specific needs of an airplane installation, one that measures the isotope ratio of the total water content, and one that measures the vapor phase only. The separate sampling is assured by the forward and sideward orientation of the air inlets and will help us in interpreting the obtained data. Here, we present the laboratory performance of this new spectrometer, namely its response time, precision and stability.

4. Références

1. A. A. LACIS, G. A. SCHMIDT, D. RIND, and R. A. RUEDY «Atmospheric CO₂: Principal control knob governing Earth's temperature», *Science*, 330, 356-359 (2010)
2. V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, A. PIRANI, S.L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M.I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T.K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU, AND B. ZHOU (eds.), IPCC, «Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896. (2021)
3. R. Q. IANNONE, D. ROMANINI, O. CATTANI, H. A. J. MEIJER, and E. KERSTEL, «Water Isotope Ratio ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) Measurements in Atmospheric Moisture Using an Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Laser Spectrometer», *Journal of Geophysical Research* 115 (D10): 1–12 (2010)

(21) Spectromètre SWIR miniature pour les applications in-situ et embarquées

A. Morand⁽¹⁾, M. Bonduelle^(1,2), N. Mestre^(1,2), S. Gousset⁽²⁾, G. Martin⁽²⁾

(1) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP**, IMEP-LAHC, F-38000, Grenoble, France

(2) Univ. Grenoble Alpes/CNRS, IPAG, F-38000 Grenoble, France

1. Introduction :

Les spectromètres ultra-compacts dans le proche infrarouge ont un immense potentiel pour les applications in situ nécessitant de très fortes résolutions spectrales. De forts besoins sont exprimés pour la détection et le monitoring de gaz directement au sol ou de les embarquer sur des vecteurs mobiles (drones, nanosat, ballons) mais aussi pour les intégrer dans des instruments plus complexes : caractérisation de lasers télécom, mesures de contrainte ou encore missions spatiales. Le spectromètre intégré proposé ici repose sur le principe d'interférométrie d'onde stationnaire (SWIFTS) [1]. On génère, à l'intérieur même du guide d'onde, un interférogramme d'onde stationnaire produit par deux ondes contra-propagatives : une directe, l'autre réfléchi sur un miroir en bout de guide d'onde (Fig.1, gauche). Un sous-échantillonnage de ce motif d'interférence est alors diffracté vers le détecteur situé au-dessus du guide par un réseau de discontinuités diélectriques de taille nanométrique (Fig.1, droite). L'intérêt du SWIFTS est d'atteindre une très haute résolution spectrale grâce à un système compact, léger et de faible dimension (typ. <10cm × 5cm × 1cm, détecteur inclus).

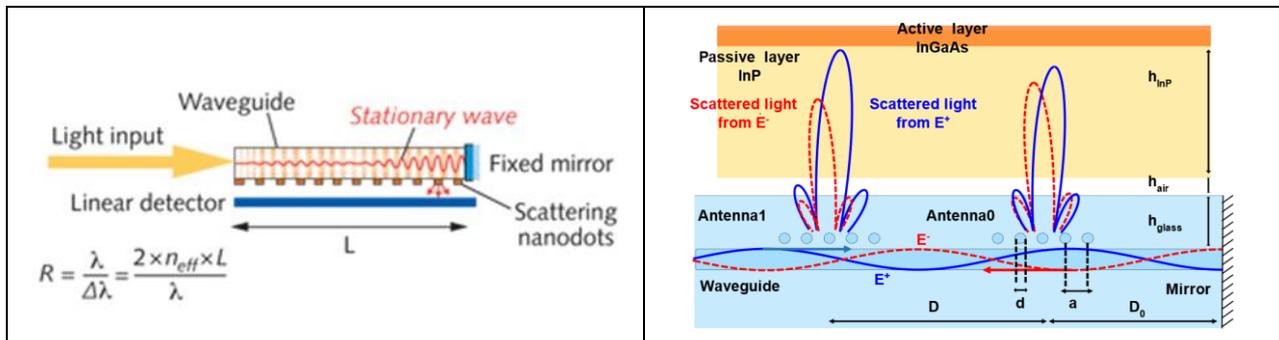


Figure 8 : A gauche : principe de l'approche i) SWIFTS en mode miroir (Lippmann). A droite : description des mini-réseaux insérés à proximité d'un guide pour améliorer la directivité du signal diffracté lié à un point d'échantillonnage de l'onde stationnaire.

La résolution spectrale est principalement proportionnelle à la longueur du réseau d'antennes (typiquement $R=30000$ pour $L=1\text{cm}$). La bande spectrale utilisable est quant à elle inversement proportionnelle à la séparation entre pixels (i.e., entre deux points d'échantillonnage consécutifs). Typiquement on atteint une étendue spectrale de 20nm pour des pixels de 20 μm de taille. Cette bande spectrale réduite, permet néanmoins le suivi avec une très grande précision de raies d'émission (lasers), ou la mesure des bandes d'absorption (monitoring du CO_2).

2. Optimisation instrumentale

Pour développer un système dans le SWIR, il a fallu concevoir des antennes pour diriger le signal échantillonné sur les zones actives du détecteur. En effet la zone active des détecteurs SWIR est au moins à 300 μm sous la surface du capteur. La discontinuité précédente est alors un réseau de nano-antennes en surface du composant, équivalent à un mini-réseau de diffraction, pour réduire le cône d'émission [2]. Cette technologie a été développée sur des guides de surface en Niobate de Lithium. En effet, des structures nanométriques sur sa surface peuvent être réalisées en utilisant un FIB. Et par la suite l'onde stationnaire sous les antennes pourra être déplacée grâce aux propriétés électro-optiques de ce matériau, permettant d'augmenter l'étendue spectrale [3].

3. Résultats

Dans un premier temps, nous avons validé le principe de réduction du cône d'émission, tout en augmentant le flux total extrait, grâce à des nano-antennes (mini-réseau de diffraction), fabriquées transversalement sur le guide [2]. On a montré qu'en augmentant le nombre de périodes de l'antenne, on améliorerait la directivité du faisceau et on ne perdait pas l'information du point

d'échantillonnage analysé issu de l'onde stationnaire dans le guide. Dans un deuxième temps, une puce plus grande a été réalisée. Elle est constituée de plusieurs guides droits interagissant avec 20 antennes de 5 sillons. Le dispositif est terminé par un miroir et le couplage se fait par un Vgroove de fibres à maintien de polarisation. Le but ultime de ce composant est d'exciter les 4 guides avec une source laser à analyser en utilisant un éclateur 1 vers 4 et de multiplexer chaque réponse des antennes pour améliorer l'efficacité du dispositif. Pour l'instant, chaque guide droit a été calibré avec un laser accordable en analysant la diffraction des antennes d'un guide. On observe sur la Fig. 2 de gauche le dispositif entier et le rayonnement des plots dans le visible et le SWIR. A droite, on observe l'évolution de la transformée de Fourier de l'onde stationnaire échantillonnée pour différentes longueurs d'ondes du laser d'excitation. Les lignes inclinées indiquent l'évolution de la fréquence mesurée par notre dispositif qui peut être associée à la longueur d'onde d'excitation. Comme on effectue un sous-échantillonnage, on observe plusieurs fenêtres de repliement.

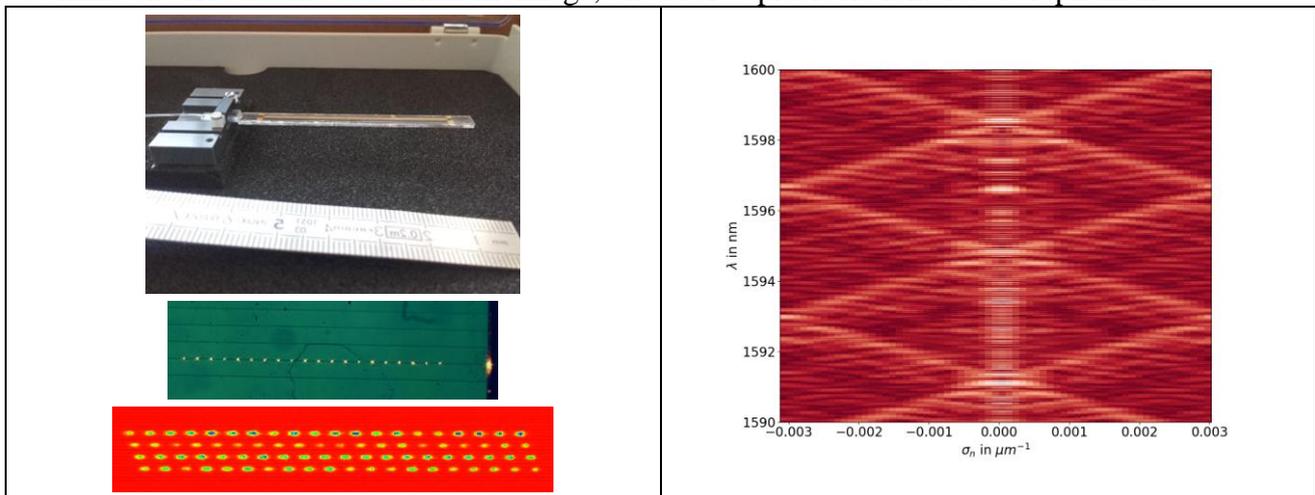


Figure 9 : A gauche : puce intégrée en Niobate de Lithium connectée à son Vgroove, diffraction d'un guide dans le visible et diffraction de 4 guides dans le SWIR. A droite : relation entre la longueur d'onde de la source accordable et sa fréquence spatiale obtenue après transformée de Fourier de l'onde stationnaire sous-échantillonnée.

4. Conclusion

Nous avons conçu, modélisé, fabriqué et caractérisé un spectromètre compact dynamique, monomode dans le proche SWIR (1.55μm). L'étape prochaine est de combiner la caméra désencapsulée avec ce dispositif pour atteindre le système compact envisagé. Ce type de dispositif permettrait à terme de réaliser des analyseurs de gaz très compacts, idéalement sur plusieurs fenêtres spectrales, de sorte à multiplexer sur une même puce la détection de plusieurs gaz d'intérêt. Le domaine 1600-1700 nm comporte en effet plusieurs fenêtres d'absorption du CO₂ et CH₄, deux gaz à effet de serre majeurs, liés aux activités humaines, mais aussi à l'activité biologique des milieux naturels. Un futur prototype de spectromètre SWIFT IR, couplé à une mesure de turbulence par Eddy-Covariance ou à des dispositifs de captation in situ, permettrait une mesure de flux de ces gaz en milieux naturels, complétant ainsi les bilans d'émissions globaux.

5. Références

1. E. Le Coarer, S. Blaize, P. Benech, I. Stefanon, A. Morand, G. Lerondel, G. Leblond, P. Kern, J.-M. Fedeli and P. Royer "Wavelength-scale stationary-wave integrated Fourier-transform spectrometry", *Nature Photonics*, 1 (8), pp.473-478, (2007).
2. A. Morand, I. Heras, G. Ulliac, E. Le Coarer, P. Benech, N. Courjal, G. Martin, "Improving the vertical radiation pattern issued from multiple nano-groove scattering centers acting as an antenna for future integrated optics Fourier transform spectrometers in the near IR", *Optics Letters*. 44(3), (2019).
3. J. Loridat, S. Heidmann, F. Thomas, G. Ulliac, N. Courjal, A. Morand, and G. Martin, "All Integrated Lithium Niobate Standing Wave Fourier Transform Electro-Optic Spectrometer," *J. Lightwave Technol.* 36, 4900-4907 (2018).

(22) Instrumentation *in-situ* de matériaux synthétiques en impression 3D : insertion de capteurs de force et fibres optiques pour la mesure de déformation.

Delphine Faure-Cattelain⁽¹⁾, Emilio Abi-Aad⁽¹⁾, Marianne Conin⁽¹⁾, Baptiste Fenneteau⁽¹⁾, Laura Gaillard⁽¹⁾, Olivier Deck⁽¹⁾.

⁽¹⁾Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, Nancy, 54500, France

1. Introduction

Dans l'objectif de mieux comprendre le comportement mécanique d'un ouvrage souterrain dans un massif rocheux fracturé, l'UMR GeoRessources dispose depuis janvier 2019 d'un dispositif expérimental novateur : Dispositif de Modélisation Analogique Triaxial (DiMiTri) conçu pour réaliser des essais mécaniques sur différents modèles réduits d'ouvrages souterrains. L'objectif à long terme est de réaliser un modèle réduit de massif rocheux fracturé afin d'étudier sa stabilité, notamment au cours d'une excavation. Le massif rocheux sera reproduit au moyen d'un matériau analogue réalisé par impression 3D combinant sable et liant phénolique [1], et sera constitué en un assemblage de blocs imprimés séparés par plusieurs discontinuités.

Ce travail vise à étudier des solutions techniques d'acquisition des déformations et contraintes dans des zones localisées du modèle réduit. L'une des contraintes du dispositif expérimental est l'inaccessibilité des blocs qui y sont insérés, DiMiTri étant une machine d'essais dite « true-triax » c'est-à-dire que l'on applique trois contraintes distinctes σ_1 , σ_2 , σ_3 , via des parois mobiles de telle sorte que l'ensemble forme une boîte opaque et fermée dans laquelle les blocs imprimés sont positionnés. Il est donc primordial de pouvoir équiper le matériau de capteurs *in situ* [2]. Deux stratégies sont possibles. La première consiste à intégrer les capteurs dans le milieu après la phase d'impression [3]. Cette approche est plus simple techniquement, mais soulève des difficultés pour garantir un contact stable et reproductible entre les capteurs et le matériau. Une seconde stratégie consiste à intégrer des capteurs dans le matériau au cours de l'impression 3D. Cette solution permet, *a priori*, de garantir le meilleur contact entre le capteur et le matériau, mais présente également le plus de difficultés techniques.

Cet article s'intéresse à la première solution envisagée. Pour cela, des essais de compression uniaxiale ont été réalisés sur des éprouvettes imprimées 3D-sable avec deux types de capteurs *in situ*. Nos choix de capteurs se sont portés d'une part sur un capteur de force plus classiquement utilisé dans l'ingénierie souterraine, d'autre part sur la fibre optique, qui est déjà utilisée dans le suivi des déformations dans des ouvrages souterrains [4].

2. Capteurs de force

L'objectif est de pouvoir mesurer les contraintes à l'intérieur du matériau. Les capteurs doivent être le moins intrusif possible, afin de minimiser leur influence sur le système. Le choix est porté sur des capteurs de 5600N, adaptés aux gammes de forces qui seront appliquées dans le dispositif final. La connexion et l'alimentation sont filaires (Figure 10a) afin de limiter l'encombrement dans l'éprouvette. Ils sont insérés dans des demi-éprouvettes cylindriques de hauteur 76 mm et diamètre 38mm, celles-ci ont été imprimées avec une cavité de taille légèrement supérieure à la taille du capteur. Afin de combler l'espace entre le matériau et le capteur, une colle à noyau a été utilisée. L'ensemble formé (éprouvette, colle et capteur) est appelé « capteur sable » (Figure 10b).

Le « capteur sable » subit différents cycles de charge décharge (Figure 10c). Chacun des cycles a été espacé d'une pause (décharge complète) de 15 min à 7 jours. On constate qu'un incrément de la force de 200N sur la totalité de l'échantillon représente un incrément de 0,5N sur le capteur soit environ 0.25% de la force totale appliquée, alors que la surface du capteur représente 2.5% de la section totale de l'éprouvette. Par ailleurs, on observe que les pentes de charge décharge au sein d'un même cycle sont comparables. Enfin, on constate que les mesures d'un cycle à l'autre ne sont pas répétables en fonction du temps de pause entre deux cycles. Bien que les mesures semblent

cohérentes en termes de pente, la mesure se trouve dans la limite basse de détection du capteur puisqu'on observe un facteur 10 entre la force supposée reprise par le capteur et la force mesurée.

Ainsi, il est envisagé d'utiliser des capteurs de plus petite valeur nominale (20N et 200N). Par ailleurs, la différence observée d'un cycle à l'autre est attribuée à l'utilisation de la colle à noyau. La solution envisagée pour la mesure des contraintes, est de prévoir un logement de la taille du capteur afin de ne pas utiliser de colle à noyau.

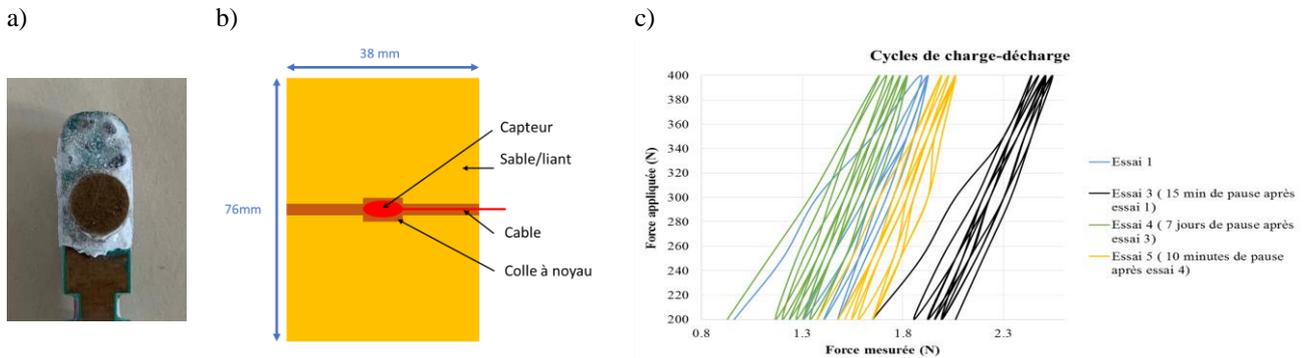


Figure 10. a) Capteur de Force diamètre 6 mm collé sur une languette de 8mm de large et de 20 mm de long b) schéma simplifié représentant l'intégration du capteur de force dans son logement dans l'éprouvette avec scellement par colle à noyau : « capteur sable » c) force appliquée par la presse en fonction de la force mesurée par le capteur au cours de différents cycles de charge-décharge espacés d'intervalles de temps de 15 min à 7 jours. Essai 3 (courbe noir) réalisé après essai 1 (courbe bleue) avec un intervalle de 15 minutes, Essai 4 (courbe verte) réalisé après essai 3 avec un intervalle de 7 jours, Essai 5 (courbe orange) réalisé après essai 4 avec un intervalle de 15 minutes

3. Fibre optique

Des tests préliminaires sont réalisés sur des cylindres (diamètre 115 mm - hauteur 230 mm) imprimés en deux parties. Les deux demi-cylindres sont assemblés avec de la colle à noyau, dans lesquelles est collée une fibre optique monomode " low bend loss " (**Figure 11 a et b**). L'objectif de ces essais est d'étudier la capacité de la fibre optique à mesurer la déformation à l'intérieur du matériau. La figure 4c montre les courbes de contrainte-déformation au centre de quatre parties longitudinales (S1, S2, S3 et S4) de la fibre optique et la déformation enregistrée par la presse. Les résultats montrent la répétabilité des mesures de la fibre optique. Cependant, un rapport de 2 à 3 entre les modules d'élasticité mesurés par la fibre et ceux de la presse est observé (**Figure 11 c**). Ce rapport est classiquement observé lors de la comparaison de mesures effectuées directement sur une presse, et celles effectuées sur des jauges collées sur l'échantillon. Il peut aussi être en partie une conséquence de la présence de la colle. En outre, la valeur de la résistance à la compression est inférieure à celle d'un cylindre continu, ceci s'explique par le plan de la colle qui fragilise le milieu où se produit la rupture.

Dans une perspective plus large, une procédure d'intégration de la fibre optique dans le matériau durant le processus d'impression est en cours de développement. L'objectif est de mesurer directement la déformation à l'intérieur du matériau.

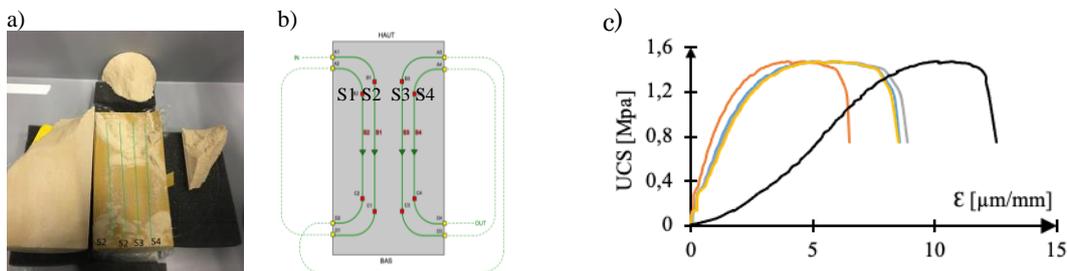


Figure 11 a) photo de l'éprouvette et la fibre optique, b) schéma d'insertion de la fibre optique c) Les courbes de contrainte-déformation. Les courbes bleue, orange, gris et jaune correspondent à la déformation mesurées au centre des quatre parties longitudinales de la fibre optique S1, S2, S3, et S4; et la courbe noire présente la déformation mesurée par le capteur de la presse.

4. Références

1. M. JACQUES-HULIN « Développement d'une méthode de conception de moules hybrides en Fonderie. Thèse de Doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, France. » (2019)
2. J. WALKER, E.HARRIS, C. LYNAGH et al « 3D printed smart molds for sand casting », International Journal of Metalcasting, (2018)
3. J. KOBLISKA, P. OSTOJIC, X. CHENG et al « Rapid Fabrication of Smart Tooling with Embedded Sensors by Casting in Molds Made by Three Dimensional Printing », (2005)
4. Y. SUI , X. CHENG, J. WEI « Distributed optic fiber monitoring of damaged lining in double-arch tunnel and analysis of its deformation mode », Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, (2021)

(23) Capteur « patch » pour la caractérisation hydrique du béton de chanvre

Mehdi Ferhat, Franck Daout, Eric Vouc'h

SATIE, UMR CNRS 8029, ENS Paris-Saclay, Université Paris-Saclay
61 Avenue du président Wilson, 94230 Cachan, France

1. Introduction :

Les propriétés des milieux poreux tels que les matériaux cimentaires (ciments, mortiers, bétons) ou géotechniques (sols, argiles) sont liées à leurs caractéristiques hydriques (teneur en eau, saturation). Il est donc utile de les mesurer. Ce type de mesures est notamment un enjeu pour le génie civil et le bâtiment. Par ailleurs, il est utile de disposer de méthodes non destructives et non invasives. A cet égard les mesures diélectriques sont intéressantes. En effet, la permittivité diélectrique relative de l'eau libre contraste fortement avec celle des autres phases (constituants) d'un milieu poreux : sa partie réelle avoisine les 80 pour une température de 20°C, contre quelques unités au maximum pour les autres phases, ce qui rend les mesures diélectriques, et RF en particulier, sensibles à l'humidité [1]. Par ailleurs, des mesures hydriques non destructives et non invasives sont possibles sur des milieux poreux avec certains capteurs RF [2].

Dans cet article nous proposons un capteur hydrique spécifiquement conçu pour le béton de chanvre (BDC), un matériau d'éco-construction à base de fibres de chanvre, qui en raison de sa forte porosité est essentiellement utilisé à des fins d'isolation thermique et de régulation hydrique des habitations [3]. Le capteur proposé est une antenne imprimée conçue pour opérer dans la bande ISM à 2,4 GHz. La mesure se fait via le coefficient de réflexion S_{11} en entrée du capteur, lequel est placé au contact du BDC. Aux fréquences considérées, les dimensions du patch sont de l'ordre de la taille maximum des hétérogénéités du BDC, à savoir 2 à 3 cm [3], et compte tenu des caractéristiques diélectriques de ce dernier ($\epsilon'_{r,BDC} \in [2 - 4]$ [4]), un tel capteur est capable d'en sonder le volume élémentaire représentatif. En outre, il est non invasif.

Dans cette étude nous présentons les résultats de la caractérisation de capteurs « patches » à 2,4 GHz optimisés pour mesurer la teneur en eau θ du BDC.

2. Caractéristique « diélectrique-hydrique » du BDC et principe du capteur « patch »

Précédemment, des mesures diélectriques réalisées au moyen d'une cellule RF en guides d'ondes rectangulaires ont été faites dans la bande ISM à 2,4 GHz sur des échantillons de BDC aux caractéristiques hydriques contrôlées [4]. Elles ont mis en évidence des variations significatives de la partie réelle de la permittivité diélectrique $\epsilon'_{r,BDC}$ du BDC en fonction de θ , ainsi qu'une évolution linéaire de $\epsilon'_{r,BDC}$ vs. θ (Cf. Figure 1 (c)). Ceci permet d'envisager de mesurer θ du BDC au moyen d'un capteur « patch ». Un tel capteur (Cf. Figure 1 (a)) est constitué d'un substrat diélectrique (de permittivité relative réelle $\epsilon'_{r,sub}$) dont une face comporte un motif métallique rayonnant, le « patch », et l'autre une couche métallique faisant office de plan de masse. Le motif est relié à une source RF. Ce dispositif présente un maximum de puissance rayonnée à une fréquence dite de résonance f_{res} . Ce sont les variations de f_{res} que nous exploitons pour mesurer θ . Pour un « patch » rectangulaire, des modèles empiriques permettent d'obtenir une expression analytique reliant f_{res} à $\epsilon'_{r,MUT}$ (le matériau sous test (MUT) étant ici le BDC). Moyennant certaines hypothèses sur les valeurs respectives de $\epsilon'_{r,sub}$ et $\epsilon'_{r,BDC}$ et sur les dimensions de l'antenne, il découle de ces modèles que la caractéristique f_{res} vs. $\epsilon'_{r,BDC}$ s'approche par une droite de pente négative, laquelle pente s'accroît d'ailleurs quand $\epsilon'_{r,sub}$ diminue. Notre capteur hydrique est donc, moyennant ces hypothèses, linéaire.

Considérant un BDC possédant la caractéristique « diélectrique-hydrique » de la Figure 1 (c), nous avons conçu et optimisé, à l'aide de simulations par éléments finis (logiciel HFSS), des capteurs hydriques répondant au cahier des charges suivant : $f_{res} \in [2,3 - 2,6 \text{ GHz}]$ et $|S_{11}(f_{res})| \leq -10 \text{ dB}$. Ceci en envisageant deux substrats : FR4 et Polyguide, dont les $\epsilon'_{r,sub}$ valent respectivement 4,35 et 2,35 ; leur hauteurs étant quant à elles identiques : $h = 1,6 \text{ mm}$ (Cf. Figure 1 (a)).

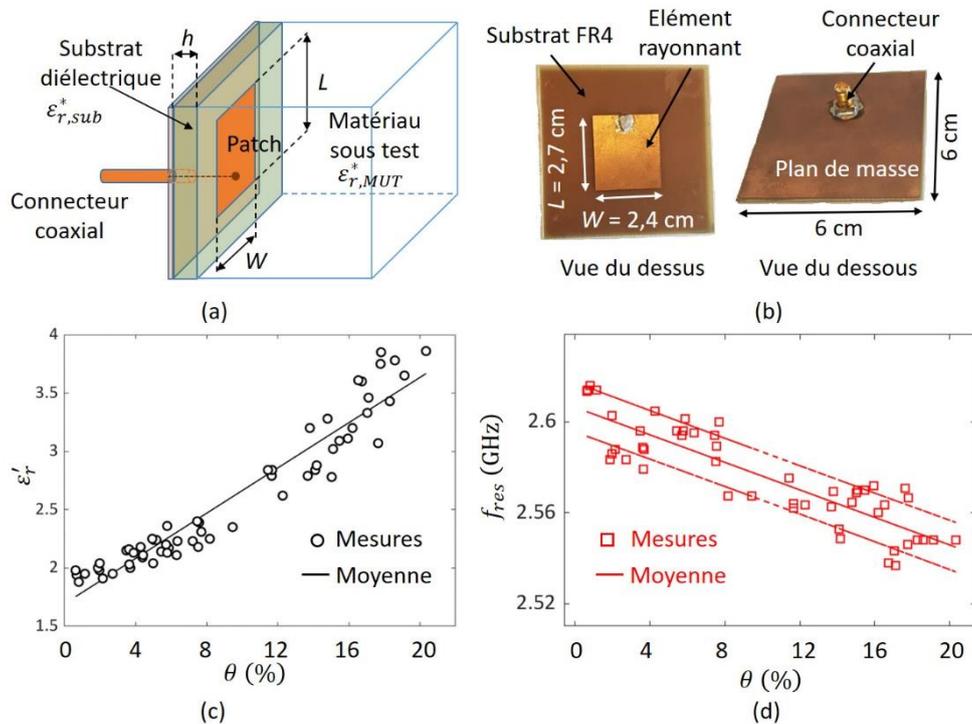


Figure 1. (a) Structure d'un capteur « patch » RF rectangulaire. (b) Capteur « patch » à 2,4 GHz sur substrat FR4. (c) Caractéristique « diélectrique-hydrrique » des échantillons de BDC. (d) Caractéristique f_{res} vs. θ du capteur « patch » rectangulaire sur substrat FR4 mesurée avec les mêmes échantillons de BDC qu'en (c).

3. Caractérisation des capteurs

Des capteurs « patches » ont été fabriqués et nous en avons mesuré le paramètre S_{11} avec un analyseur de réseau vectoriel relié au capteur par un câble coaxial. Ces mesures ont été faites en plaçant le « patch » au contact d'échantillons de BDC à θ contrôlée. Elles ont permis de vérifier que les capteurs respectent le cahier des charges fixé. D'autre part, conformément au modèle analytique, la caractéristique f_{res} vs. θ est bien linéaire et la sensibilité $S_{\theta}^{f_{res}}$ des capteurs (i.e. la pente de f_{res} vs. θ) augmente lorsque $\epsilon'_{r,sub}$ diminue (Cf. Figure 1 (d) ou Tableau 1).

| | $\epsilon'_{r,sub} = 4,35$ | $\epsilon'_{r,sub} = 2,35$ |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $S_{\theta}^{f_{res}}$ | ≈ 3 MHz/% de θ | ≈ 6 MHz/% de θ |
| Linéarité $R^2_{f_{res}}$ | $> 0,72$ | |
| | Variabilité (BDC) | Incertitudes (capteur) |
| Ecart-type σ_{θ} | 3,5 % de θ | 0,4 % de θ |

Tableau 1 Principales caractéristiques des capteurs hydriques patches rectangulaires sur substrat FR4 et Polyguide mesurées pour $\theta_{BDC} \in [0 - 20 \text{ \%}]$.

4. Conclusion

L'étude présentée a permis de valider la pertinence des capteurs RF « patches » pour la caractérisation hydrique du BDC : les capteurs considérés, conçus pour opérer à 2,4 GHz, présentent une bonne sensibilité à θ , sont linéaires et permettent des mesures non invasives et non destructives.

5. Références

1. A. BUTTRESS, A. JONES, S. KINGMAN, « Microwave processing of cement and concrete materials – towards an industrial reality? », *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 68, pp. 112–123, (2015).
2. A. CATALDO, G. MONTI, E. DE BENEDETTO, G. CANNAZZA, L. TARRICONE, « A Noninvasive Resonance-Based Method for Moisture Content Evaluation Through Microstrip Antennas », *IEEE Tran. on Instr. and Meas*, vol. 58, no. 5, pp. 1420-1426, (2009).
3. A. LABOREL-PRENERON, C., MAGNIONT, J.-E. AUBERT, « Characterization of Barley straw, hemp shiv and corn cob as ressources for bioaggregate based building materials » *Was. Biom. Valor.*, vol. 9, pp. 1095-1112, (2018).
4. M. FERHAT, F. BENNAI, B. RATNI, E. VOUREH, K. ABAHRI, F. DAOUT, « Electromagnetic Characterization of Hemp Concrete in the 2.4 GHz WiFi Frequency Band ». *IEEE MTT-S LAMC conference 2018*, pp. 1-4, (2018, dec.).

(24) Conception et mise en oeuvre d'un capteur hyperfréquence large bande pour l'analyse non-invasive de tissus cancéreux cutanés

Mohamed Zied Fritiss^{1,2}, Patrick Poulichet¹, Hakim Takhedmit¹, Laurent Lanquetin², Elodie Richalot¹, Olivier Français¹

(1) ESYCOM, CNRS UMR 9007, Université Gustave Eiffel. F.77454 Marne-la-Vallée, France

(2) Segula Technologies, 'one d'activité Pissaloup, 8 Av. Jean d'Alembert, 78190 Trappes, France

1. Introduction

Les propriétés diélectriques des tissus biologiques varient en fonction de leur composition et de l'état physiologique de la personne. Dans le cas d'un mélanome cutané, une variation de la permittivité de la peau se retrouve au niveau de la lésion en lien avec modification de la teneur en eau des cellules cancéreuses [1]. Un capteur réalisant l'imagerie de la permittivité complexe d'une zone suspecte, avec une résolution spatiale compatible avec les faibles dimensions des surfaces d'intérêt (de l'ordre du millimètre), présente un enjeu majeur [2]. Une difficulté de la mise au point de ce type de capteur tient à la sensibilité nécessaire pour la détection de faibles variations de permittivité nécessaire afin de correctement différencier le type et le degré d'évolution de la lésion.

Il existe plusieurs types de capteurs pouvant permettre de réaliser ce type de caractérisation ou détection. La sonde la plus répandue est la sonde coaxiale ouverte. Elle possède de nombreux avantages, telles que sa facilité de conception, de mise en œuvre et une très bonne résolution [3]. Dans le contexte de la détection du mélanome, sa mise en œuvre sur une technologie SIW (Substrate Integrated Waveguide) permet d'envisager son intégration sur un substrat, avec des dimensions millimétriques ouvrant la voie à d'autres perspectives d'améliorations [4].

Cet article présente les premiers résultats autour d'un capteur RF innovant, capable de relever des faibles variations de permittivité cutanée, pour pouvoir envisager la détection de différents types de tumeurs avant leur développement.

2. Choix et conception des structures de mesure

Le travail présenté est dédié à la conception, réalisation et caractérisation, d'une sonde planaire hyperfréquences permettant d'extraire les propriétés diélectriques d'un tissu biologique par une mesure directe (in vivo). La sonde proposée est composée de deux parties : (Fig. 1.a) une zone de mesure miniaturisée du type sonde ouverte et (Fig. 1.b) une ligne strip-line adaptée d'amenée du signal, depuis le générateur vers la partie sensible. La partie sensible (a) utilise un substrat en Roger 3003 contenant un via central pour le conducteur et des vias métallisés disposés en cercle en guise de paroi métallique. La partie (b) utilise deux substrats en Arlon 25N qui sont retournés et collés l'un à l'autre (Figure 1).

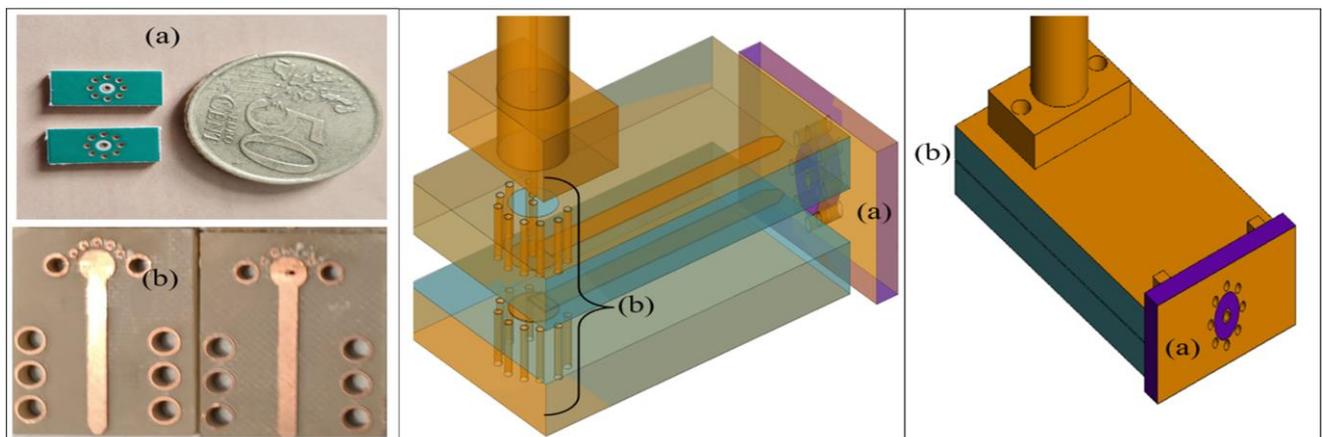


Figure 1. Vue 3D et photographie des différents éléments de la sonde proposée : (a) partie sensible (b) ligne strip-line.

3. Environnement de mesure :

Afin de pouvoir correctement caractériser et valider expérimentalement le capteur, il est nécessaire d'effectuer des tests proches des mesures in vivo. La méthode la plus utilisée est celle des tissus fantômes qui ont des propriétés électromagnétiques proches de celles des tissus

biologiques humains [5]. Des tissus fantômes ont été développés afin de reproduire les caractéristiques diélectriques d'une peau saine (Fig. 2.A) et d'une peau présentant un mélanome (Fig. 2.B) en utilisant des matériaux non toxiques et biodégradables en faisant appel à de la gélatine, de l'agar-agar, de l'eau et des microbilles de polyéthylène.

4. Résultats et analyses

Un premier prototype de sonde a été fabriqué (Fig. 2.C). Des mesures du coefficient de réflexion (S_{11}) de 1 à 6 GHz, sur des liquides de référence (Eau, Ethanol, Dimethylsulfoxyde) et des tissus fantômes (peau/tumeur) ont été réalisées (Fig. 2.D), afin de confronter les mesures et évaluer la discrimination des milieux par la sonde.

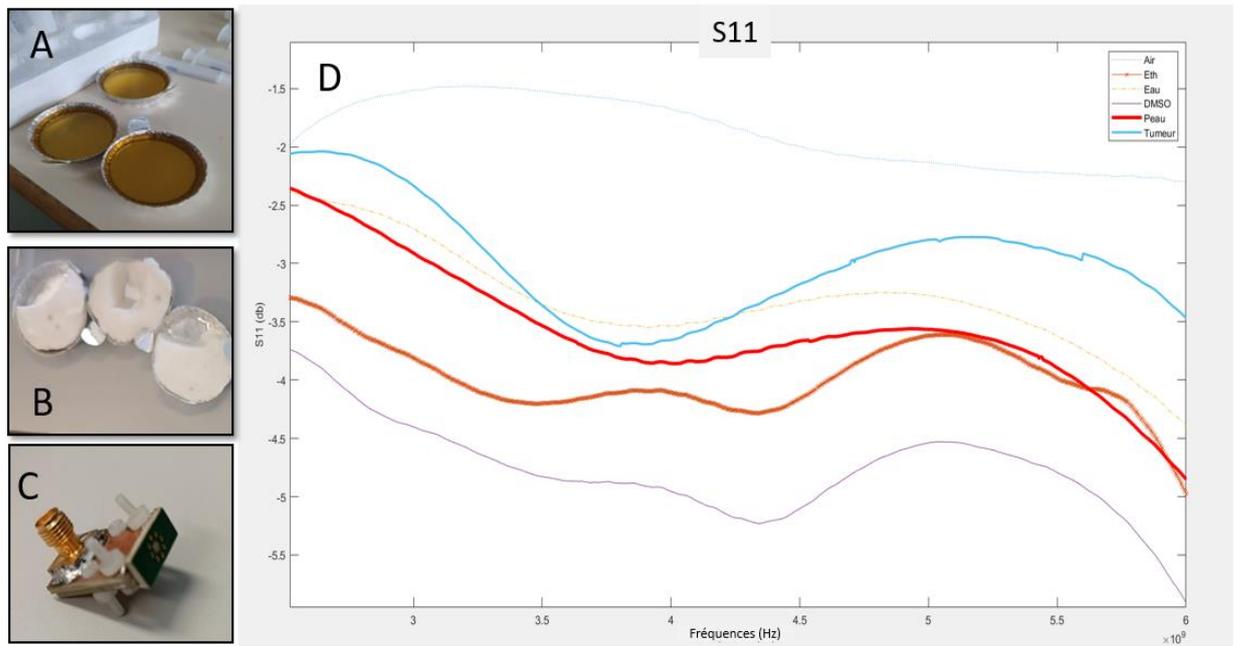


Figure 2 : A. Tissus fantômes type peau et B. tumeur C. Prototype de la sonde D. Coefficients de réflexion S_{11} obtenus avec le prototype de sonde pour différents matériaux sous test et photographie du prototype final.

5. Conclusion

Les résultats obtenus permettent d'évaluer la capacité de la sonde à analyser sur une large bande fréquentielle et différencier une tumeur d'un tissu sain, en conservant des dimensions réduites (surface de détection actuelle d'un diamètre de 1,3 mm) avec une bonne sélectivité. Grâce à une étape de calibrage, il est alors possible de remonter aux propriétés diélectriques (permittivité complexe) des tissus fantômes synthétisés.

Références

- [1] Mirbeik-Sabzevari, Amir, Robin Ashinoff, and Negar Tavassolian. "Ultra-wideband millimeter-wave dielectric characteristics of freshly excised normal and malignant human skin tissues." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 65.6 (2017): 1320-1329.
- [2] B. J. Mohammed, S. A. R. Naqvi, M. Manoufali, K. Bialkowski, A. M. Abbosh, "Changes in epidermal dielectric properties due to skin cancer across the band 1 to 50 GHz." 2018 Australian Microwave Symposium (AMS). IEEE, 2018.
- [3] La Gioia, E. Porter, I. Merunka, A. Shahzad, A. Salahuddin, M. Jones, & M. O'Halloran "Open-ended coaxial probe technique for dielectric measurement of biological tissues: Challenges and common practices." *Diagnostics* 8.2 (2018): 40.
- [4] P.M. Meaney, T. Zhou, A. Borsic, T. Farkas "Planar Probe and system for measuring dielectric properties of biological materials." U.S. Patent No. 9, 880,118. 30 Jan. 2018.
- [5]. R. Aminzadeh, M. Saviz and A. A. Shishegar, "Characterization of low-cost tissue mimicking materials at millimeter-wave frequencies," 2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering, 2015, pp. 283-287, doi: 10.1109/IranianCEE.2015.7146225.

(25) Microscopie photoacoustique pour le diagnostic médical et la thérapie

Olivier Hugon⁽¹⁾, Boudewijn van der Sanden⁽²⁾, Olivier Jacquin⁽¹⁾ et Eric Lacot⁽¹⁾

(1) Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy), UMR 5588 - Université Grenoble Alpes / CNRS
140 rue de la Physique - BP 87 - 38402 Saint Martin d'Hères - France

(2) Laboratoire de Recherche Translationnelle et Innovation
en Médecine et Complexité (TIMC), UMR 5525 - Université Grenoble Alpes / CNRS
Domaine de la Merci - 38706 La Tronche - France

1. Introduction

L'imagerie photoacoustique est une technique récente qui offre des possibilités intéressantes dans le domaine de l'imagerie en milieu optiquement diffusant, en particulier pour l'imagerie biomédicale [1]. Elle combine les avantages d'un contraste d'absorption optique élevé avec le fort pouvoir de pénétration des ondes acoustiques. Son principe repose sur l'effet photoacoustique qui consiste en la génération d'une onde acoustique au sein du milieu par effet thermoélastique aux endroits où une onde optique incidente d'intensité variable dans le temps a été absorbée. Classiquement, une source laser impulsionnelle nanoseconde est utilisée et l'ensemble du volume imagé est illuminé grâce à la diffusion de la lumière par la cible. Après chaque impulsion, les ondes acoustiques sont récupérées en surface par une sonde échographique standard et la résolution d'un problème inverse permet ensuite de localiser les absorbeurs au sein du volume. En procédant ainsi, la résolution spatiale des images est limitée par la sonde acoustique et atteint au mieux une centaine de microns. Pour aller au-delà, une possibilité est de focaliser la lumière au sein de la cible, ce qui permet d'atteindre une résolution optique de l'ordre du micron à une profondeur de l'ordre de quelques centaines de microns. L'image s'obtient alors de façon directe par balayage de la cible, ce qui réduit en outre les risques d'artefact. Dans cette configuration, la source de lumière peut avantageusement être remplacée par une diode laser modulée, plus compacte, plus robuste et moins onéreuse qu'un laser impulsionnel. Il est également facile de multiplexer plusieurs diodes laser pour obtenir simultanément les images de différents absorbeurs [2]. Enfin, il est possible d'utiliser ce même dispositif pour une photothérapie guidée par l'imagerie.

2. Dispositif expérimental

Le schéma de notre microscope photoacoustique est présenté en figure 1. Les faisceaux de quatre diodes laser (longueurs d'onde : 415, 445, 660 & 808 nm) sont modulés sinusoïdalement en intensité à différentes fréquences au voisinage de 5MHz. Ils sont combinés par un jeu de miroirs dichroïques puis focalisés sur la cible par un objectif de microscope. Les faisceaux sont élargis avant l'objectif afin de profiter de toute son ouverture numérique et ainsi optimiser la résolution des images. On obtient une résolution comprise entre 1 et 2 μm (selon la longueur d'onde) avec un objectif 20X/0.4. Le signal acoustique généré par l'absorption de la cible est capté par un transducteur ultrasonore à travers une chambre de transmission remplie de gel acoustique. Le signal du transducteur est ensuite filtré et amplifié avant d'être démodulé par les détections synchrones. Chaque détection synchrone fonctionne à une fréquence correspondant à la fréquence de modulation de l'une des diodes laser et fournit l'amplitude du signal photoacoustique généré à la longueur d'onde correspondante. Une image photoacoustique est générée en balayant les faisceaux laser sur la cible grâce à un scanner à miroirs galvanométriques. La configuration est en transmission, c'est-à-dire que les ondes acoustiques sont captées du côté opposé de la cible par rapport à l'excitation optique.

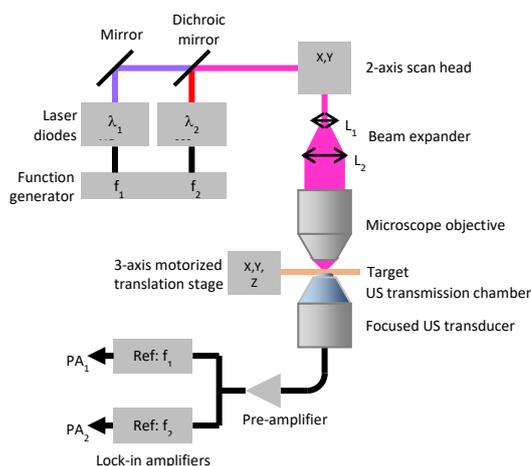


Figure 1. Schéma de principe du microscope photoacoustique

3. Applications

L'imagerie photoacoustique est particulièrement bien adaptée à l'imagerie vasculaire [3]. En effet, chez la plupart des vertébrés, l'hémoglobine assure l'oxygénation des tissus et cette molécule présente des pics d'absorption dans le vert et dans le violet. Nous avons ainsi pu obtenir des images *in vivo* de la microvascularisation d'une oreille de souris sans injection d'agent de contraste. Le caractère inoffensif de la lumière utilisée permet une utilisation prolongée de ce dispositif, ce qui nous a permis de mettre en évidence l'apparition d'anomalies dans la distribution de l'hémoglobine au sein du réseau vasculaire en cas de pathologie affectant la viscosité du sang (diabète, anémie, ...).

D'autre part, le même dispositif permet d'illuminer dans un second temps des zones spécifiques du réseau vasculaire imagé en variant la puissance ou la longueur d'onde afin d'y générer des effets photo-induits (photothermique, phototoxique, ...) et de suivre leur évolution en parallèle. Cette technique de thérapie guidée par l'imagerie peut par exemple servir à traiter des zones hémorragiques ou tumorales de façon micro-invasive avec une grande précision.

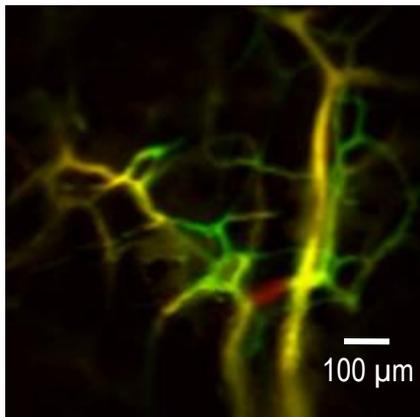


Figure 2. Diagnostic : mise en évidence de la diminution (en rouge) ou de l'augmentation (en vert) de l'hématocrite dans un réseau microvasculaire suite à l'injection de Dextran.

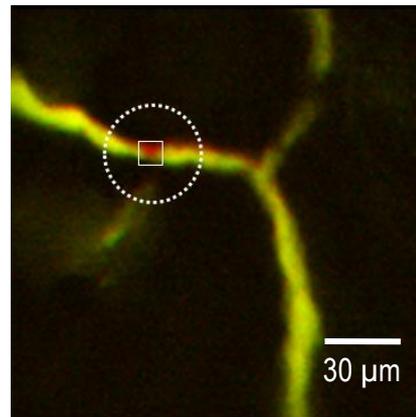


Figure 3. Thérapie photothermique guidée par l'imagerie : interruption du flux sanguin suite à une irradiation localisée sur un capillaire sanguin

Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.

4. Références

1. Wang L. V. et al, Photoacoustic Tomography: In Vivo Imaging from Organelles to Organs, *Science* 335, 1458 (2012).
2. Hugon O. et al., Multi-wavelength photo-acoustic microscopy in the frequency domain for simultaneous excitation and detection of dyes, *Biomed. Opt. Expr.* 10(2), 932-943 (2019).
3. van der Sanden B. et al., Vascular bifurcation mapping with photoacoustic microscopy, *Biomed. Opt. Expr.* 11(3), 1298-1305 (2020).

(26) Mesure photoacoustique de la densité de la vascularisation de ménisques humains

P. Paris, C. Lavet⁽¹⁾, B. Genoux⁽¹⁾, H. Mathieu⁽²⁾, S. Silvent⁽¹⁾, A. Moreau Gaudry⁽¹⁾, R. Pailhé⁽³⁾, O. Jacquin

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy), université Grenoble Alpes
«olivier.jacquin@univ-grenoble-alpes.fr»

(1) Centre d'Investigation Clinique-Innovation Technologique de Grenoble (CIC-IT), CHU Grenoble Alpes (CHUGA)

(2) IRMaGe, Grenoble Institut des Neurosciences

(3) Service Chirurgie de l'arthrose et du sport, CHU Grenoble Alpes (CHUGA)

1. Contexte :

Le ménisque possède une faible capacité cicatricielle. L'atteinte méniscale est fréquente : elle représente 15% de l'ensemble des blessures des sportifs [1] tandis que les actes de chirurgie réparatrice du ménisque représentent 30% des interventions chirurgicales du genou. Ces interventions s'effectuent le plus souvent par voie arthroscopique par le biais d'une méniscectomie totale ou partielle, ou d'une suture du site lésionnel. Ces dernières sont souvent privilégiées afin de limiter le risque de développement arthrosique résultant de l'ablation du ménisque.

Cependant les techniques actuelles de sutures méniscales affichent un taux d'échec très important (jusqu'à 43% avec une moyenne d'environ 20-30%) [2], notamment en raison de l'absence de critères objectifs d'aide à la décision pour le chirurgien. Un des critères majeurs pour l'établissement d'un pronostic de succès d'une réparation du ménisque est la présence du réseau vasculaire à proximité de la zone lésée à suturer. Celui-ci est particulièrement faible et non-homogènement réparti dans le tissu méniscal. Les outils actuels de diagnostic tels que l'IRM, l'arthroscanner ou l'arthroscopie ont permis d'améliorer la compréhension des lésions méniscales et leur détection (taille, localisation). Cependant, ces techniques ne présentent pas de signature spécifique à la présence de vascularisation. Nous proposons d'utiliser l'imagerie photoacoustique pour mesurer la présence de vascularisation dans un ménisque humain.

2. Imagerie photoacoustique :

L'Imagerie Photoacoustique (PA) est une technique d'imagerie biomédicale émergente, elle permet de réaliser des images d'absorption optique à des profondeurs centimétriques à travers des milieux diffusants. L'utilisation d'une longueur d'onde optique spécifique permet de cibler spécifiquement des chromophores à imager et de quantifier leurs concentrations. L'hémoglobine présente dans les tissus vivants peut alors jouer le rôle d'agent de contraste « endogène » et fait de l'imagerie photoacoustique une technique de premier choix pour faire de l'imagerie vasculaire en profondeur [3]. Une application phare de cette technique est de mesurer la saturation en oxygène des vaisseaux sanguins, en faisant de la spectroscopie acoustique avec un laser accordable. [4] Selon les techniques utilisées, l'imagerie photoacoustique vasculaire peut être à résolution acoustique ou à résolution optique [3]. Cependant l'augmentation de la résolution se fait au détriment de la profondeur d'imagerie. Pour une profondeur centimétrique la résolution est de l'ordre de 100µm. L'imagerie photoacoustique (P.A.) combine donc les propriétés de contraste de l'imagerie optique et de profondeur de pénétration de l'échographie et semble particulièrement bien adaptée pour apporter une information relative au réseau vasculaire au site lésionnel.

3. Preuve de concept de la mesure photoacoustique de la vascularisation d'un ménisque humain

Dans le cadre d'un projet financé par la région AURA sur des fonds FEDER, notre consortium a exploré l'intérêt et la faisabilité de la modalité photo acoustique comme un futur outil de diagnostic en qualité d'aide à la prise de décision au chirurgien. Ce projet a été mené sous la forme d'une preuve de concept avec pour objectif de détecter en ex-vivo la vascularisation méniscale.

- un dispositif d'imagerie photoacoustique destiné à la mesure ex-vivo de la vascularisation de ménisque a été développé au LIPhy ,

- une première étude clinique, associant le LiPhy, le CHUGA, le CIC-IT et la plateforme d'imagerie IRMaGe, a été menée à l'automne 2022.

Cette dernière a permis l'inclusion de patients souffrant d'arthrose bi-comportementale avec une atteinte fémoro-tibiale latéralisée interne, permettant de collecter le ménisque latéral qui reste relativement bien conservé. Les premiers résultats obtenus, sur une quinzaine de ménisques humains, sont extrêmement encourageants. Ils montrent que l'imagerie photoacoustique permet d'identifier la présence d'hémoglobine en profondeur dans un ménisque humain en respectant les normes médicales (figure 1 : image de gauche). De plus, le signal photo-acoustique recueilli sur l'ensemble des ménisques étudiés colocalise spatialement avec la zone proche du mur méniscal richement vascularisée (figure 1), résultat conforté par les analyses immunohistochimiques.

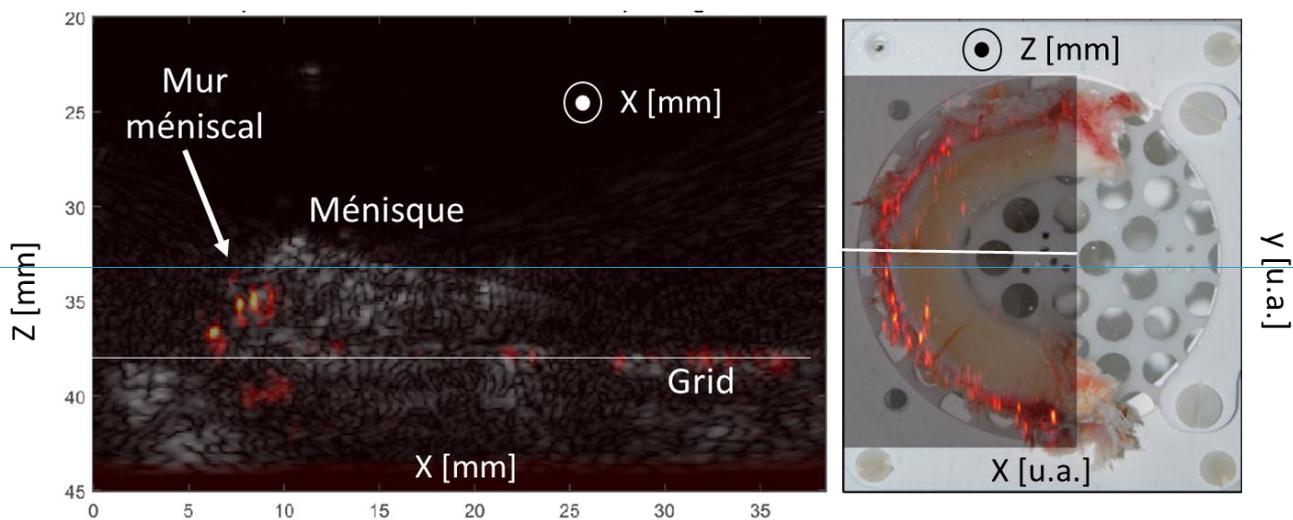


Figure 1 :

L'image de gauche montre la superposition d'une image échographique (gris) et d'une image photoacoustique (rouge) d'un ménisque humain (ex-vivo). L'image de droite superpose une image photographique et l'image photoacoustique d'un ménisque humain(ex-vivo). Sur ces deux superpositions, on distingue clairement du signal photoacoustique au niveau du mur méniscal qui correspond à une région richement vascularisée contrairement au reste du ménisque. Cette localisation de la vascularisation est tout à fait en accord avec ce qui est décrit dans la littérature.

4. Conclusion et perspectives :

Ce travail a permis de montrer la possibilité de mesurer la présence de vascularisation ex vivo dans un ménisque humain. Ce résultat doit être validé sur l'ensemble des ménisques étudiés en faisant de la fusion d'image échographique, photoacoustique, IRM et histologique. Ce travail est en cours. La suite de ce projet est de réaliser un imageur photoacoustique adapté à la mesure in vivo de la densité de vascularisation de ménisque animal et humain.

5. Références

1. Mordecai SC, Al-Hadithy N, Ware HE, Gupte CM. "Treatment of meniscal tears: An evidence based approach", World J Orthop. pp 233-41 (2014)
2. Lee GP, Diduch DR "Deteriorating outcomes after meniscal repair using the Meniscus Arrow in knees undergoing concurrent anterior cruciate ligament reconstruction: increased failure rate with long-term follow-up", Am J Sports Med 33 pp:1138–1141 (2005)
3. Beard P. "Biomedical photoacoustic imaging", Interface Focus, pp 602-31 (2011).
4. Mucong Li, Yuqi Tang, Junjie Yao, "Photoacoustic tomography of blood oxygenation: A mini review", Photoacoustics, Volume 10, pp 65-73, (2018)

(27) Capteur passif multi-résonant pour la caractérisation radiofréquence et sans contact de solutions diélectriques représentatives de milieux organiques

*Hana BOUKHAROUBA^(1,2), Alexiane PASQUIER^(1,2),
Stéphane SERFATY⁽²⁾, Pierre Yves JOUBERT⁽¹⁾*

(1) Centre de Nanosciences et Nanotechnologies, Université Paris Saclay
10 Boulevard Thomas Gobert, Palaiseau, France.

(2) SATIE, Université de Cergy Pontoise
5 mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, Cergy-Pontoise, France

1. Introduction

Les propriétés diélectriques des milieux organiques sont indicatrices de leur composition, de leur structure et de leur évolution au cours du temps. Celles-ci sont modélisées par la permittivité complexe ε^* décrivant l'interaction de la matière avec un champs électromagnétique externe, selon [1] :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega}$$

où la partie réelle ε' exprime la capacité du milieu à stocker l'énergie transmise par le champ électromagnétique rayonné (liée à sa constante diélectrique ε_r), où ε'' correspond à la nature dissipative du milieu (liée à sa conductivité électrique σ) et où ω est la pulsation. Les techniques de caractérisation diélectrique conventionnelles utilisent le plus souvent des sondes mises en contact avec le milieu, comme des électrodes, des sondes coaxiales ouvertes, ou encore des antennes « patches » dont l'usage et les performances sont parfois limités en raison du contact avec le milieu. Dans cet article, nous explorons les performances d'un capteur passif sans contact original récemment breveté [2] pour suivre les propriétés diélectriques de milieux organiques de manière non invasive. Ce capteur est un résonateur multifréquence à base de lignes de transmission circulaires, couplé de manière inductive d'un part au milieu à analyser, et d'autre part à une sonde de contrôle distante. Ce résonateur opère comme une antenne en émission/réception à haute sensibilité dans la gamme radiofréquences (RF) 20-400 MHz. Dans cette étude, nous évaluons la capacité de ce capteur à distinguer et suivre les propriétés diélectriques de solutions de référence mimant les caractéristiques diélectriques de tissus biologiques. Nous comparons également les performances du capteur à celles d'une sonde coaxiale conventionnelle de référence utilisées dans les mêmes solutions, et concluons sur l'utilisation du capteur proposé.

2. Moyens mis en œuvre et méthodes de mesure

Nous préparons des solutions diélectriques tabulées à l'aide de mélanges calibrés d'éthanol et de solutions salines (NaCl), afin de disposer de 25 solutions calibrées présentant des valeurs de conductivité variant de 0 S/m à 2 S/m, et des constantes diélectriques variant de 40 à 80.

Nous exploitons un résonateur passif multifréquence, ou Wireless Multifrequency Resonator (WMFR), constitué d'un assemblage de 8 résonateurs à ligne de transmission circulaires concentriques, imbriquées les uns dans les autres sur un même substrat souple à faible perte [3]. Compte tenu de sa structure et de ses dimensions (8 cm de diamètre extérieur), ce résonateur présente 8 résonances comprises entre 22 MHz et 355 MHz, lorsqu'il est excité par la sonde de contrôle. Nous positionnons ce WMFR sous un cristalliseur rempli tour à tour avec 700 ml des différentes solutions à tester, et plaçons la sonde de contrôle à 1 cm sous le WMFR, comme présenté (Cf. Figure 1). La sonde est connectée à un analyseur de réseau vectoriel (VNA) de telle sorte à mesurer les variations de l'impédance complexe du résonateur. Celles-ci sont modélisées par une résistance R_i et une inductance L_i , induites par la conductivité et la constante diélectrique de la solution analysée. Parallèlement, nous exploitons une sonde coaxiale à terminaison ouverte constituée d'un câble coaxial rigide ouvert de 3 mm de diamètres et de 9 cm de longueur. Cette sonde est plongée dans la solution à analyser à une profondeur de 1,5 cm, et à distance du WMFR. La sonde coaxiale est reliée directement à un deuxième VNA (Cf. Figure 1). Les propriétés diélectriques de la solution mesurée sont estimées à partir du coefficient de réflexion S_{11} de la sonde mesurée par le VNA [4].

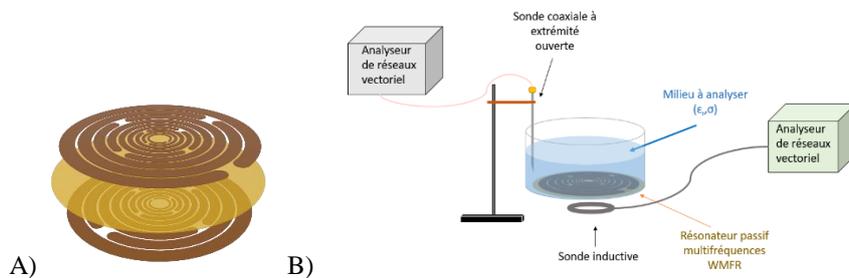


Figure 1. A) Structure du WMFR utilisé à 8 résonateurs. B) Schéma de l'expérience mettant en œuvre une sonde coaxiale plongée dans le liquide et un capteur sans contact WMFR placé sous le cristallin.

3. Résultat

Durant l'expérience, nous mesurons simultanément les propriétés diélectriques des solutions à l'aide des deux sondes, sur une gamme de fréquence de 20-400 MHz. La figure 2 montre l'évolution de la résistance R_i du WMFR, en fonction des propriétés des solutions calibrées, pour chacune des résonances du WMFR, et la conductivité estimée à l'aide de la sonde coaxiale aux mêmes fréquences. Nous remarquons une évolution de la résistance R_i similaires à celles de la conductivité estimée par la sonde coaxiale. Des résultats similaires sont obtenus pour les variations de l'inductance L_i du WMFR et de la constante diélectrique estimée par la sonde coaxiale, malgré quelques limitations inhérentes à la structure du WMFR choisi pour l'expérience.

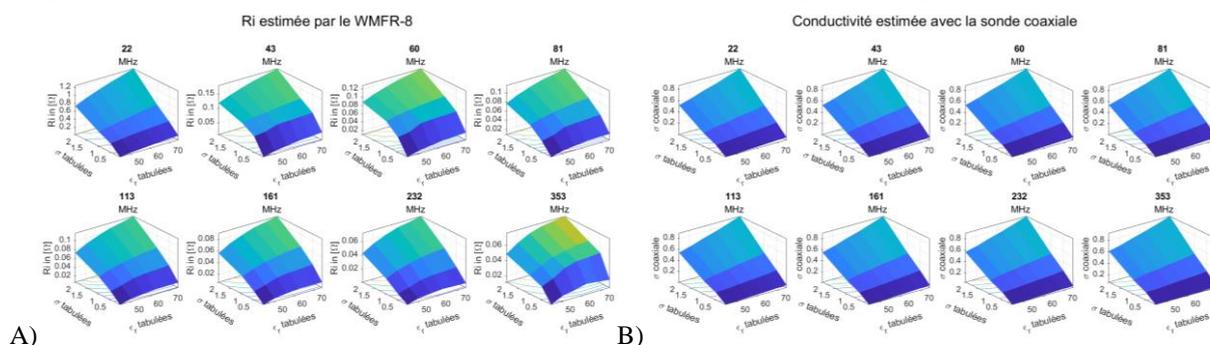


Figure 2. A) Evolution de R_i estimée par le WMFR-8 et B) Evolution des valeurs de la conductivité estimée par la sonde coaxiale, en fonction de la conductivité et la permittivité tabulées des solutions de références.

4. Conclusion

Nous avons montré dans cette étude la pertinence de l'utilisation d'un résonateur passif multifréquence RF sans contact pour estimer et suivre les propriétés diélectriques de solutions de référence. Cette étude ouvre la voie au développement de capteurs passifs non-invasifs pour le suivi de milieux organiques pour des applications médicales, agronomiques ou agroalimentaires.

5. Références

1. Gabriel, S., Lau, R. W., & Gabriel, C, « The dielectric properties of biological tissues : II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz » In *Phys. Med. Biol* (Vol. 41). (1996)
2. A. Pasquier, Y. Le Diraison, S. Serfaty, P-Y. Joubert, « Dispositif et procédé de caractérisation électromagnétique d'un milieu par résonateur, sans contact, objet et résonateur associés » Demande de brevet FR2112292 (19 novembre 2021).
3. A. Pasquier, Y. Le Diraison, S. Serfaty, P-Y. Joubert, « Multifrequency RF sensor for the non-contact monitoring of tissues » *IEEE MTT-S International Microwave Biomedical Conference (IMBioC)*, pp. 277-279 (2022).
4. T. H. N. Dinh, T. Bore, S. Serfaty et P. Y. Joubert, « Non-Invasive Evaluation of Yogurt Formation Using a Contactless Radiofrequency Inductive Technique, » *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, t. 42, p. 298-306 (2017).

(28) Conception d'une plateforme capteurs pour le contrôle et la sécurisation des procédés

Riadh LAKHMI*, Mathilde RIEU, Rouba ALRAMMOUZ, Jean-Paul VIRICELLE

Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, UMR 5307 LGF, centre SPIN, F-42023 Saint-Etienne, France

1. Introduction

Le développement des énergies vertes induit une problématique liée à l'intermittence de ces énergies. Une des solutions consiste en l'interconnexion des réseaux électriques, gaz et chaleur. Ainsi, l'énergie électrique excédentaire produite dans les moments de faible consommation des foyers serait stockée sous une forme chimique : production de H₂ par électrolyse [1]. L'hydrogène ainsi produit peut être utilisé pour des applications mobilité, inséré en quantité limitée dans le réseau gaz domestique ou encore utilisé pour le piégeage du CO₂ (produit lors de la combustion de gaz naturel) et transformation en CH₄ à travers la réaction de méthanation [2].

Le développement des procédés sur cette thématique du « Power to X » s'intensifie, et des problématiques liées à la sécurisation des procédés (fuites de CO ou H₂ éventuellement de façon concomitante) et à leur caractérisation (mesure de concentrations de CO₂ ou de CH₄ éventuellement en présence de H₂) apparaissent. Ces deux contraintes peuvent être gérées grâce à la mise en place d'une plateforme multicapteurs de gaz permettant de quantifier les gaz cités précédemment. Dans ce projet, afin de répondre à ces problématiques, une sélection de 7 capteurs commerciaux a été effectuée. Ces derniers ont été choisis volontairement avec des principes de fonctionnement très différents afin de maximiser la variance des réponses associées. Un capteur numérique NDIR a été choisi pour la mesure de CO₂. Celui-ci intègre un capteur de température ainsi qu'un capteur d'humidité de sorte que le signal de concentration en CO₂ délivré par le capteur intègre une compensation des variations de température et d'humidité. Contrairement aux autres capteurs, le capteur NDIR est sélectif. La détermination de la concentration de CO₂ ne nécessitera pas, de fait, d'analyse multivariable. La plateforme intègre également deux capteurs électrochimiques (EC-H₂ et EC-CO) très sensibles à H₂ et CO mais non sélectifs. Enfin, un capteur catalytique (CATA) et un capteur Métal-Oxide (MOX) ont été choisis pour leur sensibilité à CO, H₂ et CH₄. Les tests réalisés sur un banc gaz de laboratoire ont permis de récolter les signaux capteurs pour la création de modèles linéaires de comportement (MLR-OLS [3-4], MLR-PLS [5-6]) de la plateforme multicapteurs.

Le modèle MLR-OLS (Multi Linear Regression – Ordinary Least Squares) est une méthode de modélisation dans laquelle la construction d'une matrice de passage : M permet de passer de données expérimentales issus de capteurs, par exemple, sous la forme d'une matrice X_{ij} à une matrice de prédiction \widehat{Y}_{ij} (qui correspond par exemple à des valeurs de concentrations de gaz modélisés). M est déterminée par minimisation des moindres carrés (paramètre RMSE- Root Mean Square Error) entre les valeurs modélisées

$$\widehat{Y}_{ij} \text{ et les valeurs expérimentales } Y_{ij} : RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{N}}.$$

Dans le cas où le nombre de variable prédites (matrice \widehat{Y}_{ij}) est plutôt élevé et dans le même temps la quantité d'information issues des données expérimentales (matrice X_{ij}) insuffisante, la méthode OLS devient instable. De même, lorsque le nombre de variables expérimentales est important et que la quantité de données utilisées dans la phase de construction du modèle est insuffisante, les modèles OLS souffrent alors de problèmes de multi-colinéarités. Le modèle MLR-PLS (Multi Linear Regression – Partial Least Squares) va alors chercher à définir un modèle qui permettra de maximiser la covariance entre X_{ij} et Y_{ij} à l'aide des vecteurs latents \vec{t} et \vec{u} . Dans ce travail, une version de l'algorithme développée par Abdi et al [7] en 2010 a été utilisée à travers un code python.

2. Matériel & Méthodes

Un banc gaz instrumenté, notamment à l'aide d'une série de débitmètres a été utilisé pour la génération de mélanges gazeux de compositions déterminées. Afin de modéliser le comportement de la plateforme capteurs vis-à-vis de gaz seuls ou de mélanges binaires, la plateforme a été placée dans une cellule étanche telle que présentée en figure 1. Le conditionnement des signaux capteurs a été effectué grâce à une électronique analogique et numérique développée au laboratoire. Les signaux sont numérisés et informatisés grâce à une carte arduino pour une partie des capteurs et à l'aide d'une carte National Instruments pour l'autre partie. Une fois les données capteurs recueillies, des modélisations

comportementales linéaires (MLR-OLS, MLR-PLS) de la plateforme sont effectuées à l'aide du logiciel Excel et pour la méthode MLR-PLS d'un algorithme python utilisant la librairie « PartialLeastSquares ». Ces modèles seront utilisés pour les tests finaux de prédiction d'une composition gazeuse à partir de la réponse de la matrice de capteurs.

Par ailleurs, des modèles linéaires ont été choisis car la réponse conditionnée des capteurs aux gaz seuls reste quasiment exclusivement linéaire dans les domaines de concentrations étudiés et des modèles d'ordre supérieur ont tendance à amplifier les « bruits de mesure ».

3. Résultats et discussions

Les données capteurs utilisées pour la prédiction ont été recueillies suite à l'exposition gazeuse de la plateforme à la séquence présentée en figure 2. Pour les gaz H₂, CH₄ et CO, seuls ou en mélanges binaires, les meilleurs résultats de prédiction ont été obtenus par méthode MLR-PLS comme le montre la figure 3 ci-dessous. Les prédictions réalisées pour les 3 gaz sont relativement satisfaisantes en terme de détermination de la nature des gaz en présence. Ces dernières présentent encore malgré tout certaines imperfections : sur ou sous-estimation de concentrations, faux positifs. L'intégration dans les algorithmes de prédiction, en plus de la régression PLS, de boucles conditionnelles liées à la connaissance du comportement des capteurs permettra éventuellement de diminuer l'occurrence de faux positifs. Ils seront testés dans la suite de cette étude et comparés aux résultats actuels. Par ailleurs, dans le cadre d'autres études, des mélanges de gaz ternaires seront testés afin d'éprouver la robustesse des modèles.



Figure 1. Cellule contenant la plateforme multicapteurs

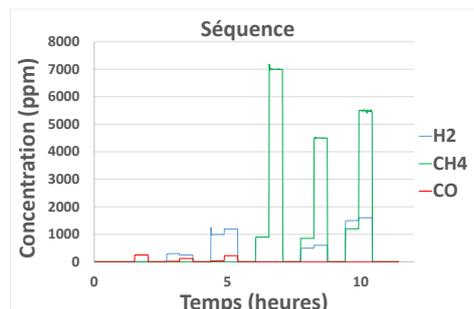


Figure 2. Séquence utilisée pour la prédiction de concentrations d'H₂ / CH₄ / CO seuls ou mélanges binaires

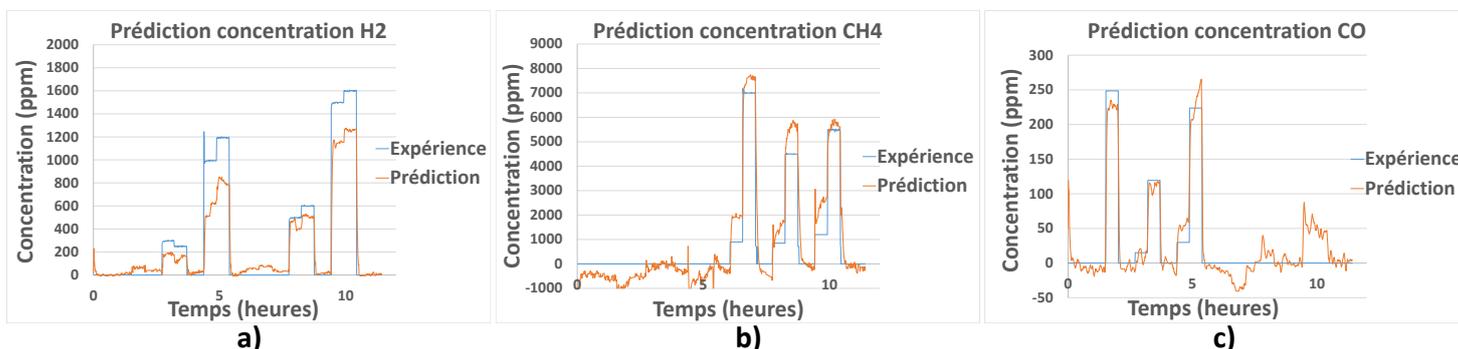


Figure 3. Prédiction des concentrations de : a) H₂, b) CH₄, c) CO par méthode MLR-PLS

4. Références

1. S. SHIVA KUMAR, HANKWON LIM, « An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production », Energy Reports, Vol. 8, pp 13793-13813 (2022)
2. J. ASHOK, S. PATI, P. HONGMANOROM, Z. TIANXI, C. JUNMEI, S. KAWI, « A review of recent catalyst advances in CO₂ methanation processes », Catalysis Today, Vol. 356, pp 471-489 (2020)

3. C. CARVALHO, F. NECHIO, T. TRISTAO, « Taylor rule estimation by OLS », *Journal of Monetary Economics*, Vol. 124, pp 140-154 (2021)
4. R. SUNDBERG, « Small-sample and selection bias effects in multivariate calibration, exemplified for OLS and PLS regressions, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* », Vol. 84, Issues 1–2, pp 21-25 (2006)
5. G. H. YAMASHITA, M. J. ANZANELLO, F. SOARES, M. K. ROCHA, F. S. FOGLIATTOA, « Selecting relevant wavelength intervals for PLS calibration based on absorbance interquartile ranges », *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 231, 104689 (2022)
6. A. M. AGUILERA, M. ESCABIAS, C. PREDA, G. SAPORTA, « Using basis expansions for estimating functional PLS regression: Applications with chemometric data », *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 104, Issue 2, pp 289-305 (2010)
7. H. ABDI, « Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression) », *Wires Computational Statistics*, Vol. 2, Issue 1, pp 97-106 (2010)

(29) Modélisation numérique par la méthode DPSM : applications à l'instrumentation et la mécanique des fluides.

Dominique Placko⁽¹⁾, Jean-Pierre Barbot⁽¹⁾⁽²⁾, Mehdi Brahiti⁽²⁾, Serge Gourlaouen⁽¹⁾⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire SATIE, UMR8029 CNRS/ENS Paris-Saclay,
4 Avenue des Sciences, 91190 Gif sur Yvette, France.

⁽²⁾FLYNAERO,
43 avenue Robert Schuman, 94150 Rungis, France.

1. Introduction

La simulation numérique est devenue un outil incontournable tant en physique qu'en ingénierie. En instrumentation, le recours à des outils de simulation s'effectue à différents stades d'étude des systèmes. En amont, ils permettent la recherche de technologie et de géométrie de capteur optimales, puis de choisir les meilleures stratégies de placements respectifs des capteurs. En aval, les outils de simulation sont de formidables outils d'investigation pour déterminer les influences respectives des grandeurs physiques mises en jeu : pression, température, champ magnétique, vitesse d'écoulement par exemple. Ils apportent ainsi une aide à la compréhension des phénomènes mesurés et sont des outils précieux lors de la création de jumeaux numériques [1].

Les méthodes de simulation numériques se fondent sur la modélisation des phénomènes physiques et sur diverses stratégies de résolution des systèmes d'équations qui en résultent. La méthode de simulation « aux éléments finis » (FEM pour Finite Element Method), par exemple, nécessite un maillage 3D sophistiqué de l'espace et met en œuvre une technique résolution itérative. Pour ces raisons, cette technique est très gourmande en ressources informatiques et requière de longs temps de calcul.

La méthode DPSM (pour Distributed Point Source Method) [2] exploite une stratégie alternative pour résoudre les fonctions de Green, solutions du problème, et s'apparente aux méthodes BEM (pour Boundary Element Method). De ce fait, la méthode DPSM ne requière qu'un maillage surfacique des objets étudiés. Le caractère naturellement 3D de cette modélisation et sa résolution non itérative lui confèrent des temps de simulation très significativement réduits comparativement aux simulations FEM. La modélisation DPSM permet de simuler l'évolution de grandeurs physiques dans des domaines aussi variés que les ultra-sons, la magnétostatique, l'électrostatique, l'électromagnétisme et la mécanique des fluides [3, 4, 5].

Dans cette contribution, la deuxième section rappellera les principes de la méthode de simulation multi-physique DPSM. Dans la troisième section, après avoir rappelé les analogies fortes en terme de formulation théorique entre plusieurs domaines de la physique tels que l'électromagnétisme et la mécanique des fluides, seront présentés quelques exemples de simulation DPSM dans des domaines de la physique aussi variés que les ultra-sons, la magnétostatique et la mécanique des fluides. Enfin, une quatrième section conclura et ouvrira des perspectives d'évolution de la méthode DPSM.

2. Principes de base de la modélisation DPSM

La méthode DPSM est une méthode qui, à partir de la solution pour une source et de conditions aux limites imposées sur les interfaces du problème, permet de calculer les grandeurs d'intérêt dans tout l'espace considéré. Elle est en ce sens pleinement comparable principe des sources de Huygens.

La résolution du système résultant s'opère en trois étapes. Dans un premier temps, les surfaces actives sont discrétisées en remplaçant chaque élément de surface active par un point test imposant des conditions aux limites, et une source équivalente reculée par rapport à l'élément de surface et portant la solution connue des équations de Green $g(\cdot)$ du problème à un facteur λ près (voir figure 1). Dans un deuxième temps, les couplages entre les sources et les points tests sont exprimés sous forme d'une matrice M . L'inversion matricielle de M permet d'accéder aux valeurs

de λ de chacune des sources. Par unicité de la solution, ces valeurs de λ_i ne dépendent que de la source S_i et non du point de l'espace sur lequel on souhaite effectuer le calcul, la troisième étape consiste alors à estimer la grandeur d'intérêt à partir des contributions respectives de chacun des points sources pondérées par λ .

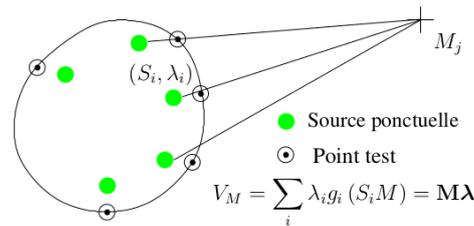


Figure 1. Principe des sources et points tests en DPSM

3. Exemples de simulation DPSM

En mécanique des fluides, l'écoulement d'un fluide newtonien est régi par les équations de Navier et Stokes. Lorsque le fluide est supposé incompressible, on retrouve de très fortes analogies entre la résolution des équations de Navier-Stokes et les équations de Maxwell [6]. Ainsi, sur la base du théorème d'Helmutz-Hodge [7], la contribution de chacune des sources pourra être décomposée en la somme d'un terme scalaire et d'un terme rotationnel, à l'instar de la force de Lorentz $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$ qui s'exerce sur une charge q se déplaçant à la vitesse \vec{v} et soumises à un champ électrique \vec{E} (force scalaire) et un champ magnétique \vec{B} (force rotationnelle). Ces deux types de sources permettront de modéliser respectivement l'écoulement et la circulation d'un fluide massique, comme elles permettront de modéliser les forces exercées sur une particule chargée en électromagnétisme.

Dans cette contribution, des résultats de simulation obtenus à partir de la modélisation DPSM sont comparés à des simulations de type FEM (ANSYS/Fluent) ainsi qu'à des résultats expérimentaux. Dans le cas de la mécanique des fluides, ces comparaisons sont effectuées sur la base de grandeurs physiques : C_x et C_z , de la complexité du maillage et mais également des temps de simulation.

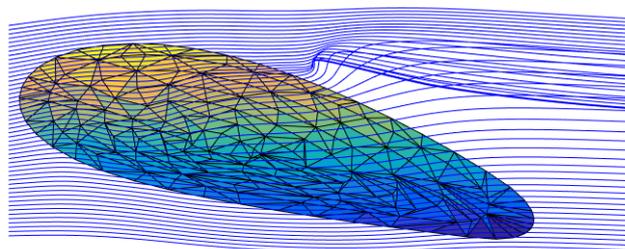


Figure 2. Tourbillons marginaux en bout d'aile modélisés en cumulant les effets des sources DPSM.

4. Conclusion

Ainsi, basée sur un principe original, la méthode DPSM permet de modéliser, à partir de sources discrètes, divers phénomènes physiques. La méthode DPSM se distingue par des temps de simulation significativement réduits comparativement à des simulations de type FEM, rendant possible l'exploitation de techniques telles que le p-design pour la conception des futurs avions [8,9].

5. Références

1. Grieves, M. Virtually "Intelligent Product Systems : Digital and Physical Twins", American Institute of Aeronautics and Astronautics, July (2019).
2. D. Placko and T. Kundu. "DPSM for modeling engineering problems". Wiley-Interscience, (2007).

3. D. Placko, J.-P. Barbot, A. Rivolet, and S. Gourlaouen. “Modélisation multiphysique DPSM, application à la mécanique des fluides”. In 8ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation (C2I’2019), Bordeaux, France, January 2019.
4. D. Placko, S. Gourlaouen, A. Rivollet, and J.-P. Barbot. “Towards real-time aerodynamic simulations”. 54th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics, March 2019.
5. D. Placko, S. Gourlaouen, J.-P. Barbot, and A. Rivollet. “New Approach of Aerodata Computation for Simulation”. RAES, Bristol, UK, July 2018.
6. Haralambos Marmanis, “Analogy between the Navier-Stokes equations and Maxwell’s equations: Application to turbulence”. 10 :1428–1437, 06 (1998).
7. Y. F. Gui and W. B. Dou., “A rigorous and completed statement on Helmholtz theorem” Progress In Electromagnetics Research, 69 :287–304, (2007).
8. Brett Malone and William H. Mason. “Aircraft concept optimization using the global sensitivity approach and parametric multiobjective figures of merit”. AIAA, August (1992).
9. D. Placko, A. Placko, S. Gourlaouen, and J.-P. Barbot. “P-design improvement using the DPSM method”. 56th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics, March 2022.

(30) Dispositif d'imagerie métrologique dimensionnelle d'épaisseur sans contact de haute précision

Camille Bataille, Philippe Moreau, Aurélien Gourrier

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique,
140 Rue de la Physique, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France

1. Introduction

Les instruments métrologiques de mesure d'épaisseur se partagent en deux familles : les mesures d'épaisseur mécanique avec contact (rugosimètres, palpeurs, pied à coulisse) et sans contact basées sur différentes technologies, e.g. acoustique, optique, térahertz, rayon X. Ces dernières sont particulièrement indiquées dans le cas d'échantillons fragiles. Cependant, la recherche d'une précision de l'ordre du micron limite le champ des possibilités. Le choix est d'autant plus restreint si l'objet est fortement hétérogène puisqu'une mesure ponctuelle est alors nécessaire à l'échelle des hétérogénéités. Une cartographie d'échantillon doit, en outre, être réalisée pour caractériser la distribution statistique des mesures. La méthode de mesure d'épaisseur décrite dans cet article (brevet FR3107346) permet de répondre à ces contraintes en cartographiant les variations d'épaisseur à l'échelle micrométrique d'échantillons de matériaux fragiles et fortement hétérogènes avec une résolution latérale (précision de la cartographie) de l'ordre de la dizaine de microns.

2. Présentation de la méthode de mesure de cartographie d'épaisseur

Le procédé consiste à mesurer les variations topographiques de surface de part et d'autre d'un échantillon et à en déduire les modulations d'épaisseur à l'échelle du micron. Deux capteurs laser ponctuels de position de surface, fonctionnant par triangulation de la réflexion diffuse à la surface de l'objet, sont situés de part et d'autre de l'échantillon à mesurer. Une calibration de l'épaisseur (différence entre les positions des deux surfaces) est effectuée à l'aide d'une cale étalon d'épaisseur certifiée. Les variations de hauteur des surfaces de l'échantillon sont mesurées par rapport à la surface de référence, pour chacune des positions balayées par le système de scan (x, y), ce qui permet de reconstruire les cartographies d'épaisseur.

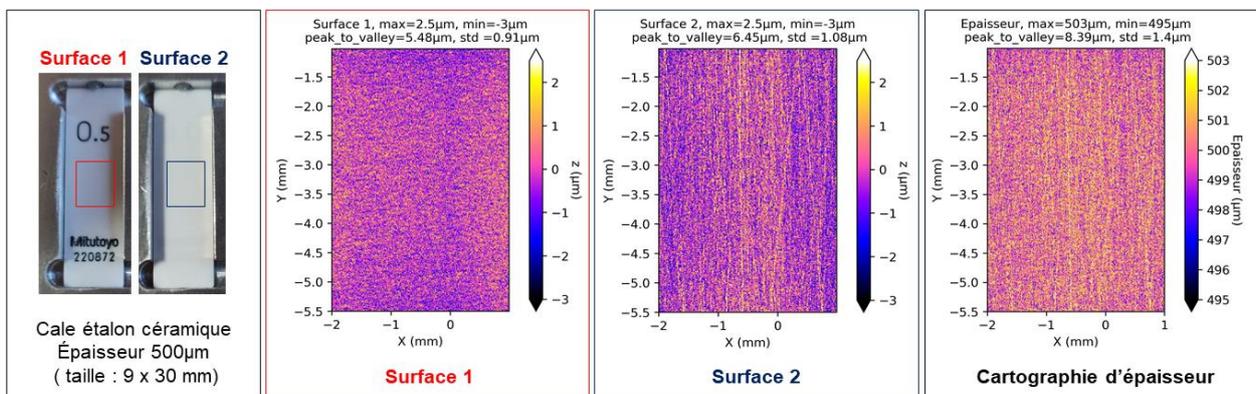


Figure 12. Cartographie d'une cale étalon en céramique certifiée (JCSS 0030) d'épaisseur 500 µm (taille 3 x 4,5mm)

Une cartographie d'une cale céramique certifiée JCSS 0030 d'épaisseur 500 µm avec une variation de 0.06 µm d'épaisseur (+0.05µm/-0.01µm) est réalisée suivant cette méthode. Les topologies des surfaces du dessus (Surface 1) et du dessous (Surface 2) de l'échantillon ainsi que la cartographie d'épaisseur sont illustrées (Cf. Figure 1). La mesure de la cale étalon permet de faire une première estimation de la dispersion des mesures sur un matériau diffusant. Notre laser ayant un diamètre de 25µm au plan focal, un pas de 10 µm est sélectionné afin de respecter le critère d'échantillonnage de Nyquist. Les surfaces 1 et 2 sont corrigées de l'inclinaison de l'échantillon par un ajustement au moindre carré. Les points de mesures situés en dehors de la limite des 3σ sont considérés comme aberrants et sont supprimés. La mesure de cartographie d'épaisseur présente un écart type de 1.4 µm, ce qui nous montre que la précision de notre mesure est proche du micromètre en moyenne. La dispersion des mesures dans un intervalle de confiance de +/- 0.02 µm peut provenir de divers paramètres. La texture des surfaces 1 et 2 de l'échantillon, notamment, présente des caractéristiques

différentes sur nos cartographies : la première semble isotrope et la seconde présente des stries verticales. Des tests plus poussés ont permis d'établir que l'orientation orthogonale des capteurs par rapport à l'échantillon permet de mettre en évidence des stries de polissages résiduelles de l'ordre de 50 nm. Notre procédé permet donc également de distinguer différents états de surfaces.

3. Application de la méthode de cartographie d'épaisseur

Pour illustrer le potentiel de cette méthode, différentes applications ont été testées. La mesure d'une aile de mouche (Cf. Figure 2) démontre qu'il est possible de mesurer des matériaux organiques transparents fragiles. Hors de la structure, l'aile de mouche mesurée présente une épaisseur de 452 μm et un écart-type de 10 μm .

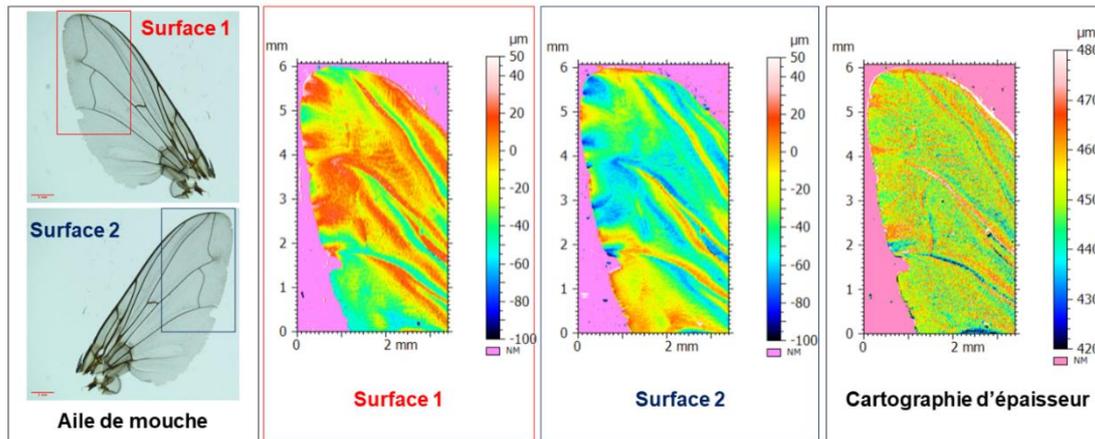


Figure 13. Photos des deux faces de l'aile de mouche à la loupe binoculaire (grandissement x1.7), topographies des surfaces 1 et 2 de l'aile puis cartographie d'épaisseur d'une aile de mouche avec un pas de 10 μm (taille 2.7 x 6,2mm).

Une mesure réalisée sur une carte électronique avec un pas de 10 μm (Cf. Figure 3) démontre que l'on peut identifier des éléments de nature et d'échelles différentes : soudures, écritures à l'encre, gravures et divers composants électroniques. Sur ces cartographies, le plus grand élément fait 1.1 mm de hauteur alors que les marquages ne font que 10 à 20 μm . La cartographie d'épaisseur est plus complexe à interpréter mais constitue une mesure d'ensemble.

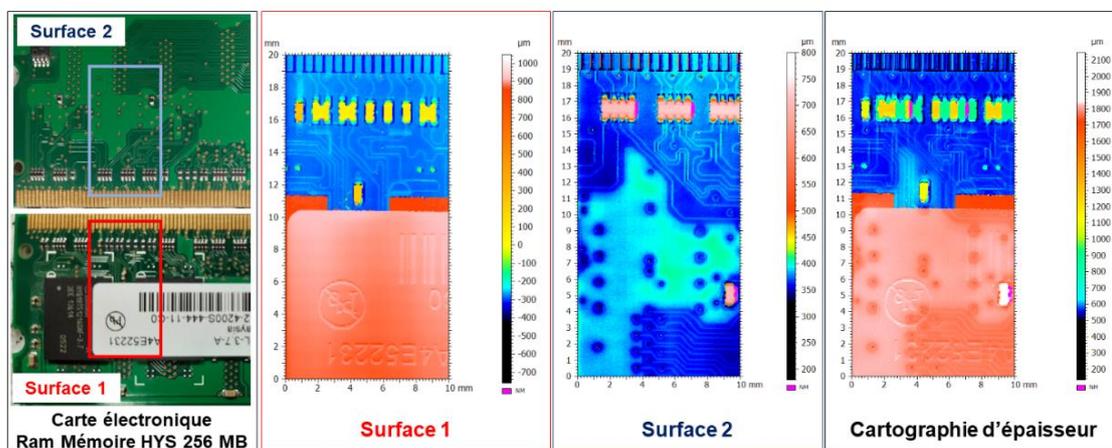


Figure 14. Topographies et cartographie d'épaisseur d'une carte électronique avec un pas de 50 μm (taille : 10 x 20 mm)

4. Conclusion

Les résultats expérimentaux sur la mesure d'une cale étalon certifiée (Cf. Figure 1) et les deux exemples d'applications (Cf. Figures 2 et 3) démontrent le potentiel de cette méthode pour cartographier des épaisseurs sur des échantillons complexes hétérogènes. Cette méthode a pour avantage de prendre en compte les variations topologiques des deux faces de l'échantillon ce qui représente un avantage sur la grande majorité des technologies existantes basées sur 1 seul capteur de mesure et d'une surface de référence, par exemple.

(31) Transmission d'information par isolation capacitive pour auto-accord de fréquence

M. Zhang¹, I. Khan¹, N. Llaser²,

¹ C2N - CNRS
Université Paris Saclay
91120 Palaiseau

² LPO Dorian
74 Av. Philippe August
75011 Paris, France

1. Introduction :

Les pathologies cancéreuses sont l'une des causes principales de la mortalité dans le monde. Différents soins ont déjà été proposés, étudiés et mis en applications dans le passé et leurs efficacités ont été approuvées de différentes manières. Avec l'avancé des technologies, d'autres soins complémentaires ont été proposés et ils sont très prometteurs et attirent de plus en plus d'attentions. Parmi les soins possibles, la technique HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) attire une attention particulière car elle dispose de plusieurs avantages par rapport aux soins plus conventionnels : non invasive, effet secondaire bien réduit et traitement ciblé aux zones concernées [1]. Cette technique est basée sur l'ablation des cellules cancéreuses engendrée par HIFU et elle est souvent assistée par l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) pour la mesure de température, la localisation des cellules cancéreuses et le suivi du traitement.

Dans ce contexte, nous avons proposé un circuit de pilotage des transducteurs ultrasonores ayant un rendement élevé de la conversion énergétique grâce à l'utilisation d'un amplificateur de puissance Classe-D suivi par un filtre qui dispose d'un auto-accord de fréquence afin de récupérer uniquement la composante fondamentale. Cette technique d'auto-accord de fréquence est tout à fait compatible avec la technologie des circuits intégrés [2]. Les résultats expérimentaux effectués sur un circuit PCB ont confirmé le fonctionnement attendu [3]. Notre objectif final est d'implémenter le circuit de pilotage du transducteur en circuits intégrés. Cependant vers une implémentation totale du circuit de pilotage en circuit intégré, nous devons encore lever de nombreux défis technologiques. L'un d'entre eux est la transmission du signal de contrôle de l'auto-accorde de fréquence par une isolation électrique à cause d'une différence de potentiel entre le circuit de puissance et le circuit de contrôle.

Dans la littérature, trois types d'isolation peuvent être identifiés [4-5] : isolation inductive, isolation optique et isolation capacitive. L'isolation inductive est la méthode la plus souvent utilisée grâce à sa maturité. Cependant, elle utilise un composant magnétique qui émet un champ magnétique. De plus ce composant magnétique est relativement encombrant et donc difficile à être intégré sur silicium. Comme mentionné auparavant, la méthode de soin par HIFU nécessite souvent l'assistance par l'IRM. Cette dernière émet aussi un fort champ magnétique. Ils ne sont donc pas compatibles. En ce qui concerne l'isolation optique, il n'y a pas de problème de compatibilité. Mais il est reconnu que l'isolation optique souffre d'un faible dV/dt . Ainsi elle risque de ne pas suivre une variation de tension relativement rapide, ce qui peut être le cas dans notre application. L'isolation capacitive est celle qui est relativement moins utilisée. Il y a donc relativement moins de travaux concernant l'isolation capacitive dans la littérature. Cependant elle est tout à fait compatible avec la technologie CMOS et peut transmettre facilement une variation de tension rapide. De plus une isolation capacitive est compatible avec l'IRM. C'est pour ces raisons que nous avons choisi une isolation capacitive pour notre application.

Les défis majeurs pour notre application sont la transmission d'un signal à un AC switch dont la masse est flottante par rapport à la masse principale du système. La difficulté majeure est qu'un signal important apparait entre la masse flottante de l'AC switch et la masse principale. Ce signal que nous appelons mode commun dans l'article a une fréquence qui est la même que le signal à transmettre, c'est-à-dire 1MHz pour notre application, mais une amplitude qui peut atteindre les 50V soit 10 fois plus élevée que celle du signal de pilotage. La conception d'un tel système de

mesure et de transmission doit non seulement tenir compte de ces défis mais aussi être compatible avec la technologie visée pour atteindre l'objectif final de transmettre le signal de contrôle de l'AC switch pour le pilotage de l'auto-accord de fréquence.

Dans la suite, nous commençons par une présentation de l'application de ce système dans la section 2 afin de mieux situer le contexte de la conception. Puis nous présentons une structure existante à isolation capacitive dans la section 3, analysant notamment ses avantages et ses inconvénients. Dans la section 4, nous présentons le système de transmission d'information à l'isolation capacitive que nous avons proposé notamment en soulignant ses avantages par rapport à celle existante. Les résultats de simulation seront présentés dans la section 5 suivis par une conclusion.

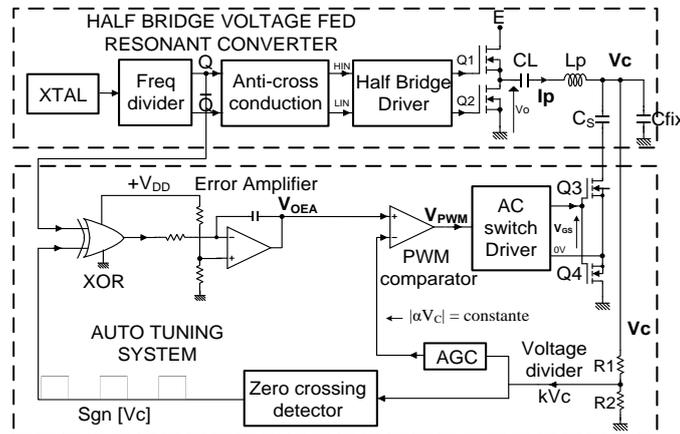


Figure 1. Circuit résonant avec capacité commutée synchrone pour auto accorder la fréquence de résonance du circuit résonant [2]

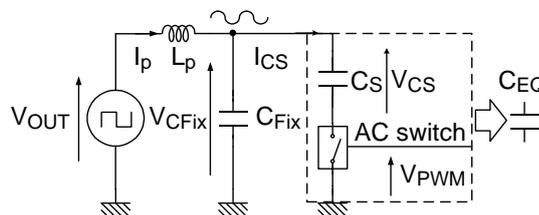


Figure 2. Circuit simplifié d'accord statique résonant

2. Contexte de l'application :

Afin de mieux comprendre le contexte du problème rencontré pour la génération du signal de contrôle pour auto-accord de fréquence, nous allons présenter brièvement dans cette section le concept de l'auto-accord de fréquence. Le schéma de principe est illustré à la figure 1. Nous identifions deux parties du système entourées par deux cadres : la partie du haut autour de l'amplificateur de puissance dite classe-D suivi par un circuit résonant incluant le transducteur ultrasonore simplifié par son modèle simple soit un condensateur et la partie du bas autour d'un interrupteur dit AC switch composé de deux transistors Q3 et Q4 permettant la réalisation de l'auto-accord de fréquence.

L'amplificateur de puissance classe-D a été choisi pour son rendement de conversion énergétique élevé avec un signal carré en sortie (> 90% en théorie) par rapport à un amplificateur de puissance classique, dit linéaire, avec un signal sinusoïdal en sortie. Cependant le signal de sortie pour piloter le transducteur ultrasonore pour application HIFU doit être un signal sinusoïdal. Ainsi un circuit résonant est ajouté entre l'amplificateur et le transducteur afin de filtrer et laisser passer uniquement la composante fondamentale. De plus au cours d'un traitement, en fonction de traitements visés et de la partie du corps humain concernée, le modèle du transducteur peut avoir certains paramètres qui fluctuent, ce qui va engendrer une variation du signal issue du transducteur.

Les conséquences sont non seulement la réduction du rendement de la conversion énergétique mais aussi le risque de mettre la vie du patient en danger. En dehors de la variation du transducteur, les composants constituant le circuit résonant peuvent aussi être imparfaits engendrant éventuellement le désaccord du circuit résonant et baissant le rendement de la conversion énergétique.

Afin de résoudre ces problèmes, nous avons proposé une technique auto-accord de fréquence dans l'objectif d'auto-compenser les dérives possibles du circuit résonant. Le principe se repose sur le réglage automatique de la fréquence de résonance par l'ajout d'une capacité variable. Habituellement on utilise un composant appelé Varicap dont le principe est basé sur une diode polarisée en inverse et qui permet d'obtenir une capacité variable dont la valeur est entre 10 et 100pF. La difficulté rencontrée dans notre application est que la valeur de capacité variable est relativement importante de l'ordre de nF, ce qui est impossible à obtenir avec une diode Varicap.

La solution que nous avons proposée précédemment est appelée capacité synchrone [2]. L'idée est d'utiliser une capacité secondaire de valeur relativement importante (quelques nF) mise en parallèle avec une capacité fixée de valeur choisie. La commutation de la capacité secondaire C_s durant une période du signal va produire l'effet d'une capacité équivalente variable selon son temps de connexion sur le circuit (Figure 2). La durée de la connexion de la capacité au circuit dépend de la valeur voulue. Cependant étant donné que le signal aux bornes de cette capacité est un signal sinusoïdal et donc alternatif, nous devons utiliser un interrupteur spécial souvent appelé AC switch contenant une masse flottante et l'associer au circuit de transmission du signal de commande avec une isolation capacitive pour contrôler la fermeture et l'ouverture de cet AC switch aussi bien pour un signal positif que pour un signal négatif aux bornes de cet AC switch.

3. Analyse d'une structure existante à isolation capacitive :

Comme mentionné dans l'introduction, notre objectif final est de proposer une réalisation d'un tel système en circuit intégré. Il est donc important d'avoir de réfléchir à la compatibilité du circuit proposé avec la technologie CMOS, ce qui justifie notre choix de l'isolation capacitive.

Parmi les travaux publiés dans la littérature, une proposition à isolation capacitive a attiré notre attention [4]. Elle est composée de deux parties (Cf : Figure 1) : modulateur et démodulateur. Le fonctionnement d'un tel système peut être décrit ci-dessous :

Modulateur : le cœur du circuit est un oscillateur de fréquence porteuse. Lors que le signal de commande V_{cmd} est à '1', la sortie de l'oscillateur V_m est à '1'. Cependant dans le cas contraire, c'est-à-dire si $V_{cmd} = '0'$, le modulateur fonctionne comme un oscillateur à relaxation. La fréquence d'oscillation dépend de la constante du temps formée par la résistance R_m et le condensateur C_m . L'oscillateur fonctionne à travers la charge et la décharge du condensateur C_m via la résistance R_m . Par conséquent, une modulation d'amplitude peut être obtenue à la sortie du modulateur.

Démodulateur : le signal modulé en amplitude est transmis au démodulateur via une isolation capacitive C_c qui forme également une isolation électrique. Dans le démodulateur, l'amplificateur formé par le transistor T associé aux résistances de polarisation et de charge permet d'apporter une amplification au signal reçu atténué par l'isolateur capacitif dont la haute fréquence est éliminée par le filtre formé en outre par le condensateur C_4 . La fréquence de coupure de ce filtre passe-bas est choisie de façon que le signal de haute fréquence soit filtré laissant uniquement le signal disposant de la même fréquence que le signal d'entrée V_{cmd} . Enfin un comparateur hystérésis est utilisé pour restaurer le signal de commande V_{cmd} et éliminer le signal résiduel de fréquence porteuse.

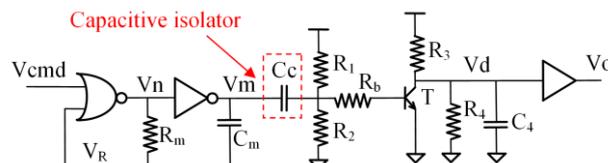


Figure 3. Isolation capacitive pour la transmission d'information [4].

Analyse : Cependant ce système existant est basé sur la technologie Bipolaire et conçu avec une topologie pour des composants discrets. Non seulement la performance du circuit est limitée mais aussi il n'est adapté pour une intégration sur silicium avec la technologie CMOS. Pour donner un exemple, nous pouvons citer la limitation en fréquence à cause de l'utilisation d'une charge résistive $R3$. De plus, l'oscillateur utilisé dans le modulateur peut être facilement influencé par le bruit électronique car il n'y a pas de comparateur hystérésis utilisée afin de réduire l'impact du bruit.

4. Système différentiel proposé :

Basé sur l'analyse donnée dans la section précédente, nous avons proposé une nouvelle structure qui est illustrée sur la figure 4. Premièrement, cette nouvelle structure est basée sur la technologie CMOS au lieu de la technologie bipolaire, ce qui permettra de bénéficier d'une technologie plus avancée avec une intégration de composants plus importants pour une surface donnée. Deuxièmement, nous avons choisi une topologie différentielle au lieu d'une topologie simple proposée dans [4]. Cette topologie différentielle rend ce système plus robuste et plus stable vis-à-vis de l'impact du bruit sur le signal car l'influence sur les deux signaux en opposition de phase sera annulée par la détection différentielle. Troisièmement, un comparateur hystérésis est ajouté dans le circuit de modulateur (Cf : Figure 5 (a)), ce qui permettra de mieux contrôler la fréquence d'oscillation contre la présence de bruit qui est inévitable. Quatrièmement, au lieu d'utiliser un condensateur flottant qui est le cas dans la structure existante, nous avons proposé un oscillateur avec un condensateur fixé à la masse. Cette structure est donc plus robuste vis-à-vis de la capacité parasite du condensateur inévitable avec une technologie intégrée. Cinquièmement, la conception est optimisée de façon à trouver un compromis entre la performance, la consommation d'énergie et le délai du signal de sortie par rapport au signal d'entrée. Sixièmement, une charge active est utilisée pour l'amplificateur dans le démodulateur (Cf : Figure 5 (b)). Pour une réalisation en circuit intégré, elle occupera moins de surface, offrira une fréquence de fonctionnement plus élevée et plage dynamique plus importante pour le signal de sortie avec une charge active. Cependant ces avantages obtenus ont un prix. La structure différentielle consomme naturellement plus d'énergie. Afin d'éviter une augmentation de la consommation, nous avons proposé une structure partiellement différentielle, ce qui nous permet de profiter des avantages au maximum et de réduire la consommation au minimum.

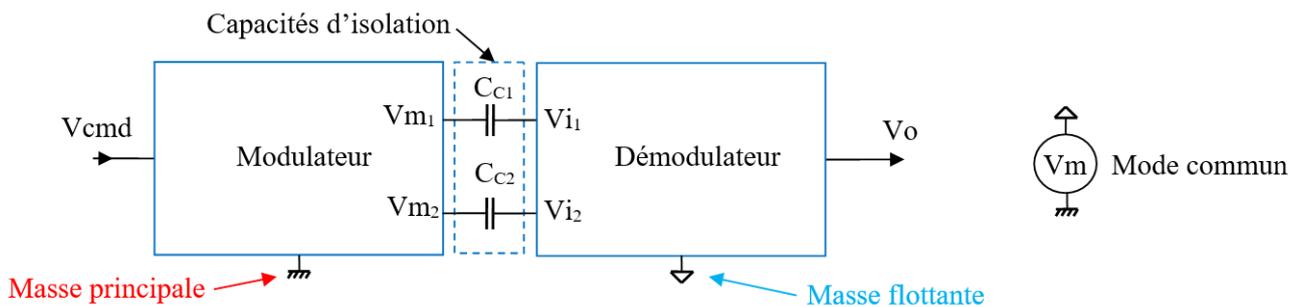


Figure 4. Système différentiel proposé pour la transmission d'information à isolation capacitive.

5. Considérations pour la conception

Afin de réduire le doublement des composants dans l'objectif de réduire la consommation pour le modulateur, nous avons tout simplement ajouté trois inverseurs. Pour rendre le fonctionnement de l'oscillateur indépendant de la charge et garantir son bon fonctionnement, les inverseurs I_3 , I_4 et I_5 sont ajoutés. I_3 et I_5 sont dimensionnés dépendant du choix des capacités d'isolations. Un compromis est nécessaire entre le nombre d'inverseur, la taille des inverseurs et le temps de transfert qui doit rester court pour ne pas retarder le signal de commande des AC switch. I_4 est ajouté tout simplement pour inverser les phases entre V_{m1} et V_{m2} , qui sont des signaux en opposition de phase comme dans tout système différentiel. Un seul oscillateur est utilisé dans cette

structure de modulateur. La différence entre la masse principale du modulateur et la masse flottante du démodulateur sera retrouvée sur les deux signaux différentiels comme un signal du mode commun. Ce signal mode commun est illustré par V_m sur la figure 4.

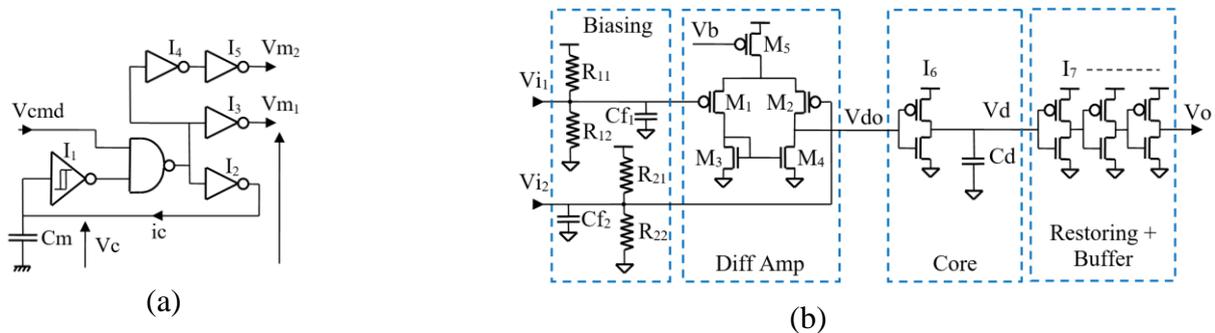


Figure 5. Modulateur différentiel (a) et démodulateur différentiel (b) proposés.

Ce mode commun sera ensuite bien atténué par le filtre formé par C_c , C_f et les résistances de polarisations, puis supprimé par le démodulateur différentiel proposé. Cependant, la conception du démodulateur est relativement délicate. Nous allons souligner quelques points critiques : tout d'abord, le circuit de polarisation, l'isolateur capacitif et le condensateur de grille du transistor d'entrée forment un filtre passe-haut. La fréquence de coupure de ce dernier est choisie pour qu'il puisse apporter une bonne atténuation du signal mode commun en laissant passer les composantes de haute fréquence qui contiennent l'information de commande de l'AC switch.

Dans le démodulateur, un amplificateur différentiel est nécessaire afin de détecter et amplifier la différence du signal modulé atténué par le filtre passe-haut. Quel que soit le niveau du mode commun, si le mode commun reste dans la plage admissible par les entrées de l'amplificateur, le signal différentiel peut être détecté et amplifié, ce qui n'est pas le cas pour un amplificateur simple. Cependant pour renforcer la sensibilité de l'amplificateur différentiel, nous avons proposé d'ajouter un deuxième étage simple sous forme d'un inverseur push-pull. Mais le dimensionnement de cet inverseur se fait d'une manière qu'il forme un filtre passe-bas avec le condensateur suivant dont la fréquence de coupure est choisie pour laisser passer uniquement le signal modulant, c'est-à-dire le signal de commande.

D'autre part, nous avons mentionné auparavant l'utilisation d'une masse flottante est inévitable pour la réalisation d'un interrupteur (AC switch) permettant de passer un signal sinusoïdal. Cette masse flottante vient du fait que l'interrupteur doit pouvoir être ouvert/fermé vis-à-vis d'un signal alternatif (sinusoïdal dans ce cas présent) et sa plage de variation correspond presque à l'amplitude du signal sinusoïdal et avec la même fréquence que ce dernier. Dans notre précédente réalisation [2], le potentiel de masse flottante par rapport à la masse principale est de l'ordre de 50V soit presque la moitié du signal crête à crête, ce qui signifie que le modulateur et son système de commande sont référencés à la masse principale et le démodulateur à la masse flottante de l'AC switch. Par contre, comme dit auparavant, son effet sur la transmission du signal de commande est équivalent à un signal mode commun qui a la même fréquence que le signal de commande mais une amplitude bien plus importante. Pour réaliser l'auto-accord de fréquence, le circuit de transmission du signal de commande doit être capable de récupérer le signal de commande malgré la présence du signal mode commun.

Pour que les capacités d'isolations puissent supporter la tension désirée, nous avons choisi la technologie CMOS HV 0,35 μ m. La tension de grille d'un transistor peut atteindre les 20V tandis que le maximum de tension supportée par une capacité peut être de plus de 125V. La tension maximale entre le drain et la source d'un transistor peut être de 120V. Ainsi ce signal mode commun peut être répartie entre les capacités d'isolations et la capacité de grille de leur transistor

d'entrée respectif. Or à l'intérieur des circuits modulateur et démodulateur, les tensions sont bien inférieures à la tension d'alimentation soit 5V dans notre cas.

6. Résultats de simulation

Afin de vérifier le fonctionnement du système proposé, nous avons effectué les simulations électriques à l'aide du logiciel Spice avec les paramètres correspondant à ceux de la technologie CMOS HV 0,35 μ m. Pour simuler le mode commun, un générateur sinusoïdal a été placé entre les deux masses utilisées par le modulateur et le démodulateur. Les résultats de simulation du système proposé sont illustrés dans la figure 6. Nous remarquons que le signal de commande est bien restauré à la sortie du système de transmission que nous proposons malgré la présence d'une masse flottante. Grâce à cette structure innovante, le système est capable de fonctionner avec une masse flottante qui peut bien dépasser les 50V atteignant presque 100V, ce qui ouvre la possibilité pour d'autres applications.

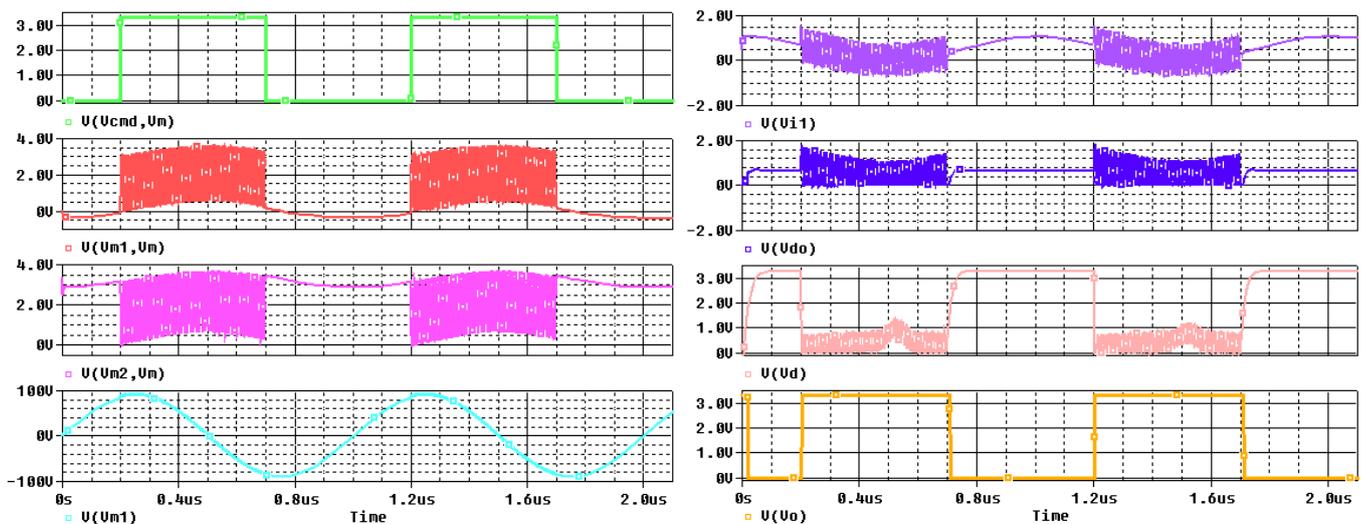


Figure 6. Résultats de simulation avec la masse flottante du modulateur (à gauche) et du démodulateur (à droite)

7. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un système de transmission d'information par isolation capacitive. Ce système est particulièrement utile lorsque le circuit de transmission et le circuit de réception ne partagent pas la même masse. Les avantages du système proposé sont multiples : compatibilité avec des technologies CMOS, compatibilité avec des circuits intégrés, robustesse vis-à-vis des dispersions technologiques et capacité de fonctionner avec un mode commun important. Grâce à l'isolation capacitive, ce système est aussi compatible avec l'IRM, ce qui facilite la mise en place de nouveaux soins médicaux, comme par exemple le traitement des cancers par HIFU, avec un système moins encombrant et plus performant. Dans notre cas, le système proposé permet de générer le signal de pilotage d'un AC switch. Grâce à l'innovation de la structure proposée, ce système est capable de fonctionner avec une masse flottante pouvant atteindre presque les 100V.

8. Références

1. N. P. K. Ellens, et al, «A novel, flat, electronically-steered phased array transducer. for tissue ablation: prelim results», Phys in med and bio, 60, pp. 2195-2215 (2015).
2. X. WANG, M. ZHANG, N. LLASER, « CMOS 0.35 μ m implementation of an auto-tuning system for a resonant converter », Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 89, N° 1, pp 35-44 (2016).

3. X. WANG, M. ZHANG, N. LLASER, « Auto-accord d'un transducteur ultrasonique pour application médicale », Colloque C2I, Bordeaux (2018).
4. Ph. J. CRAWLEY, S. GHOSHAL, J. R. CAMAGNA, « Digital isolator with communication across an isolation barrier », Brevet USA (2011).
5. V. H. Nguyen, N. Ly, A. H. Alameh, Y. Blaqui re and G. Cowan, "A Versatile 200-V Capacitor Coupled Level Shifter for Fully Floating Multi MHz Gate Drivers," IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, doi: 10.1109/TCSII.2021.3066980.

(32) Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy for highly sensitive in situ gas analysis

Marianne BEAUMONT, Irène VENTRILLARD, Roberto GRILLI⁽¹⁾, Daniele ROMANINI

Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy), Univ. Grenoble Alpes, CNRS
F-38000 Grenoble, France

(1) Institut des Géosciences et de l'Environnement (IGE), Univ. Grenoble Alpes, CNRS
F-38000 Grenoble, France

1. Introduction

Optical-Feedback Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy (OF-CEAS) belongs to the ultra-sensitive techniques that exploit a long optical absorption path within a resonant optical cavity as the sample cell. OF-CEAS was introduced and patented by Romanini and co-workers at LIPhy¹. It solves one of the major problems of other techniques: the difficulty of injecting a sufficient amount of laser light into a high finesse optical cavity, providing better spectral resolution and signal-to-noise ratio. OF-CEAS analyzers were developed in different spectral ranges, from the UV (with ECDL laser²) to the near Infrared (DFB lasers¹), and more recently in the mid infrared spectral region (QCL³ and ICL lasers⁴).

2. OF-CEAS principle

OF-CEAS is an optical cavity-enhanced laser absorption technique. Photons trapped between the highly reflective mirrors ($R > 99.99\%$) of the cavity will have a very long lifetime in the absence of intracavity absorption, translating into an effective absorption path length that can easily reach tens of km within a very compact set-up: in our case the cavity length is typically 50 cm. The originality of OF-CEAS is that the cavity is made of three mirrors placed in a "V-shaped" configuration (Figure 1). In this way, when the laser frequency matches the frequency of a resonant cavity "mode", the laser beam is coupled into the optical cavity and a fraction of the light trapped inside the cavity can be returned to the laser. The non-linear response of the laser is then used to force it to lase on the exact frequency of the excited cavity mode. This "optical feedback" (OF) effect is also responsible for a narrowing of the laser emission linewidth and an increase of the cavity transmission to a level that is orders of magnitude larger than in competing techniques.

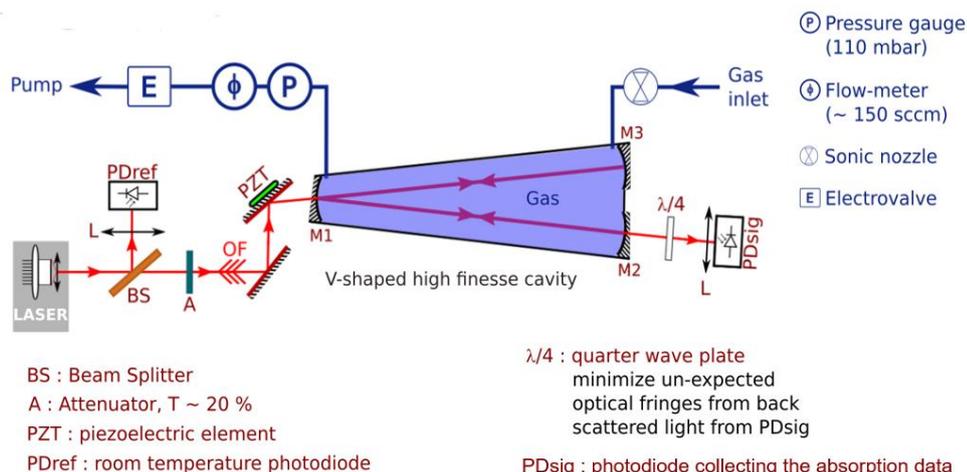


Figure 15. OFCEAS typical setup.

OF-CEAS absorption spectra are acquired by scanning the laser frequency in a small spectral region ($\sim 0.5 \text{ cm}^{-1}$), which allows selective concentration measurements at a fast acquisition rate ($\sim 10 \text{ Hz}$). However, the response time is not limited by this, but rather by the gas exchange rate inside the measurement volume. Therefore, the cell is designed with minimal dead space and a small sample volume of a few tens of cm^3 . The gas is continuously flowing with a cell pressure

stabilized to a relatively low value (~100 mbar), provides a typical gas exchange time around 1 s, which can be further improved by using a lower sample pressure or a higher pumping rate.

Importantly, OF-CEAS provides quantitative absorption measurements in real-time without the need for periodic calibration (using certified gas mixtures). It is self-calibrated thanks to a ring-down event measuring the optical losses once every spectrum⁵. The smallest detectable absorption coefficient is typically of the order of 10^{-10} cm⁻¹ in the near infrared region⁵.

3. Examples of OFCEAS in-situ monitoring

OFCEAS allows fast, sensitive and selective gas analysis in real time with compact instruments that can be operated by non-specialists. Instruments are now commercially available from AP2E company. State of the art analysers were developed at the LIPhy for in-situ measurements in different field of applications. Here we give some recent applications :

- Atmospheric CO and CH₄ measurements on airplane⁶ or stratospheric balloon, for greenhouse gases monitoring and atmospheric chemistry.
- On line monitoring of CO and NO in exhaled gas for lung inflammation evaluation in various medical pathologies^{7,8}
- In situ subaquatic measurements of dissolved gas (CH₄, C₂H₆ and $\delta^{13}\text{C}\text{H}_4$) to understand processes of gas exchange between biomass and water, and identify origin, sources and sinks of hydrocarbons in aquatic systems⁹.

4. References

1. MORVILLE, J., KASSI, S., CHENEVIER, M. & ROMANINI, D. Fast, low-noise, mode-by-mode, cavity-enhanced absorption spectroscopy by diode-laser self-locking. *Appl. Phys. B* **80**, 1027–1038 (2005).
2. COURTILLOT, I., MORVILLE, J., MOTTO-ROS, V. & ROMANINI, D. Sub-ppb NO₂ detection by optical feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy with a blue diode laser. *Appl. Phys. B* **85**, 407–412 (2006).
3. GORROTXATEGI-CARBAJO, P. *et al.* Optical-feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy with a quantum-cascade laser yields the lowest formaldehyde detection limit. *Appl. Phys. B* **110**, 309–314 (2013).
4. RICHARD, L., ROMANINI, D. & VENTRILLARD, I., Nitric Oxide Analysis Down to ppt Levels by Optical-Feedback Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy. *Sensors* **18**, 1997 (2018).
5. DESBOIS, T., VENTRILLARD, I. & ROMANINI, D. Simultaneous cavity-enhanced and cavity ringdown absorption spectroscopy using optical feedback. *Appl. Phys. B* **116**, 195–201 (2014).
6. VENTRILLARD, I. *et al.* Comparison of optical-feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy and gas chromatography for ground-based and airborne measurements of atmospheric CO concentration. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **10**, 1803–1812 (2017).
7. CHOLLIER, T. *et al.* Monitoring of endogenous nitric oxide exhaled by pig lungs during ex-vivo lung perfusion. *J. Breath Res.* **15**, 027103 (2021).
8. V. BRECKMANN, R. BRIOT, I. VENTRILLARD, M. BARBADO, K. JAULIN, C. TROCME, DE WOLF, M. GLORION, E. S. Continuous endogenous exhaled CO monitoring by laser spectrometer in human EVLP before lung transplantation. *Transpl. Int.* **35**, (2022).
9. GRILLI, R., DELSONTRO, T., GARNIER, J., JACOB, F. & NEMERY, J. A novel high-resolution in situ tool for studying carbon biogeochemical processes in aquatic systems : The Lake Aiguebelette case study. *ESS Open Arch.* (2022).

(34) Source de courant de précision à large bande pour l'excitation d'échantillons Biologiques vivants

J. ROY, P. POULICHET, L. ROUSSEAU, A. REZGUI, O. FRANCAIS

ESYCOM, CNRS UMR 9007, Université Gustave Eiffel, F 77454 Marne-la-Vallée, France

1. Introduction

Les études du comportement diélectrique de tissus vivants par mesures d'impédance ont montré depuis plus d'un siècle la possibilité de caractériser différents paramètres physiologiques de cellules et du milieu qui les contiennent [1]. De par la nature des échantillons considérés, une excitation en courant plutôt qu'en tension est généralement préférée afin de ne pas dégrader les échantillons. De nos jours, les chercheurs se heurtent aux limites techniques de l'étude en dynamique qui, en plus d'un faible courant et d'une haute précision, doivent pouvoir caractériser un échantillon sur une large bande de fréquence [2]. La source de courant présentée dans cet article est une solution à faible coût pour répondre à ces besoins, avec des courants allant du nA au mA, et une bande passante allant du continu à au moins 40MHz.

2. Principe de la source de courant

La source de courant différentielle, du type source de Howland [3], s'appuie sur un amplificateur purement différentiel (AD8132) et une structure "Terminaison Active" (Fig. 1) usuellement utilisé pour adapter une impédance de ligne variable [4]

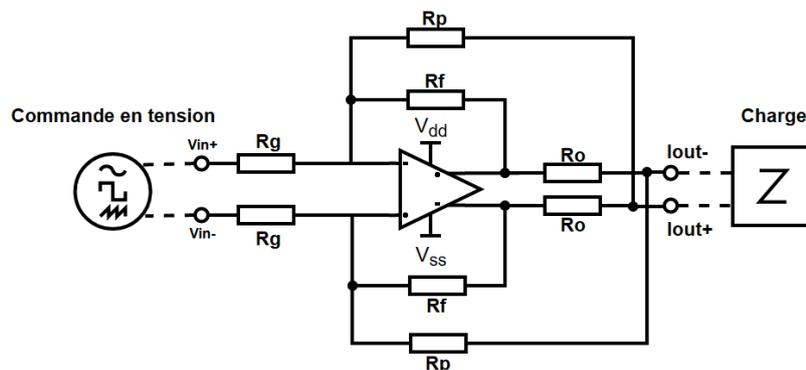


Figure 1. Schéma fonctionnel de la source de courant

Considérant la symétrie et la fonction de transfert du montage, le courant I_{out} est donné par l'équation 1 [3]:

$$I_{out} = V_{in} \frac{R_f}{2R_g R_o} \quad \text{eq. 1}$$

3. Méthodologie et validation des résultats

L'analyse des limites de ce montage se base sur une étude numérique des résultats théoriques par la simulation (Altium SPICE) et par la réalisation d'un circuit imprimé dédié. La conception s'appuie sur un cahier des charges d'un courant de 500 μA pour une tension de commande de 1 V. Soit comme valeurs pour les composants : $R_g=R_f=11.2\text{k}$, $R_p=10.2\text{k}$ et $R_o=1\text{k}$. Le courant attendu en sortie est de $V_{in} * 5e-4$.

La Figure 2.A montre le courant maximal atteignable, en simulation, en fonction de la résistance de charge en continu, cela permet de montrer que le courant maximal est défini par la tension de saturation en sortie de l'AD8132 (ici 6.4V). Celle-ci dépend directement de la tension d'alimentation. Cette limitation peut être largement compensée en ajoutant des condensateurs en série avec R_o ($V_{sat} > 50\text{V}$) [2] au prix d'une coupure en basse fréquence. Néanmoins, afin de conserver la pleine bande passante, il est préférable de moduler l'amplitude de la tension de

commande afin de réduire le courant en sortie et ainsi conserver la tension en dessous du seuil de saturation.

La Figure 2.B correspond à la réponse en fréquence de la source de courant. La résonance à 41MHz est modulable via l'ajout d'un condensateur (~0.5pF) en parallèle de Rp, ce qui permet de compenser la fréquence de coupure induite par les capacités parasites du système réel.

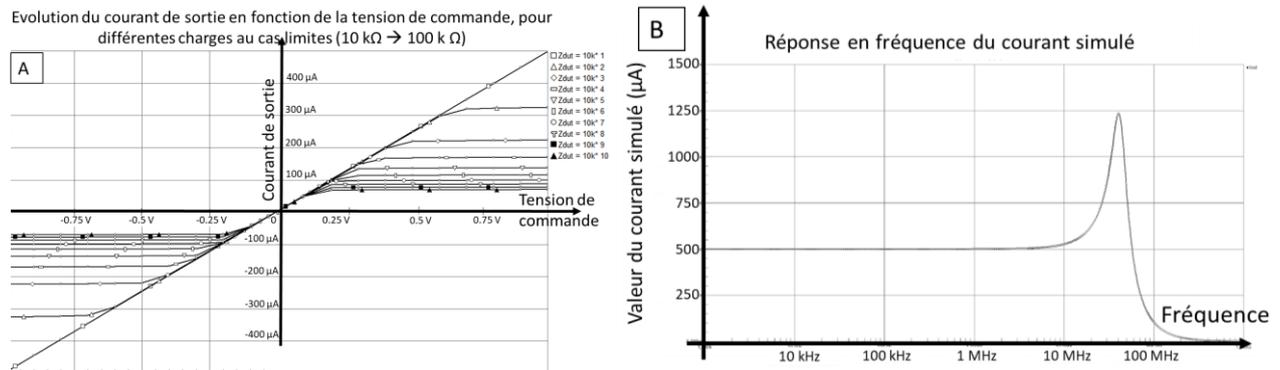


Figure 2: A. Réponse de la source de courant selon la charge, B. réponse en fréquence de la source de courant

La Figure 3.A montre la carte réalisée à partir des simulations précédemment mentionnées. Pour cette première version, servant de prototype fonctionnel, les composants ont été espacés afin de conserver un espace de travail pour les essais. Elle pourra être miniaturisée par la suite. La tension différentielle d'entrées de la source de courant est générée par une DDS (Direct Digital Synthesis AD9851) dont le code numérique est délivré par un PSOC.

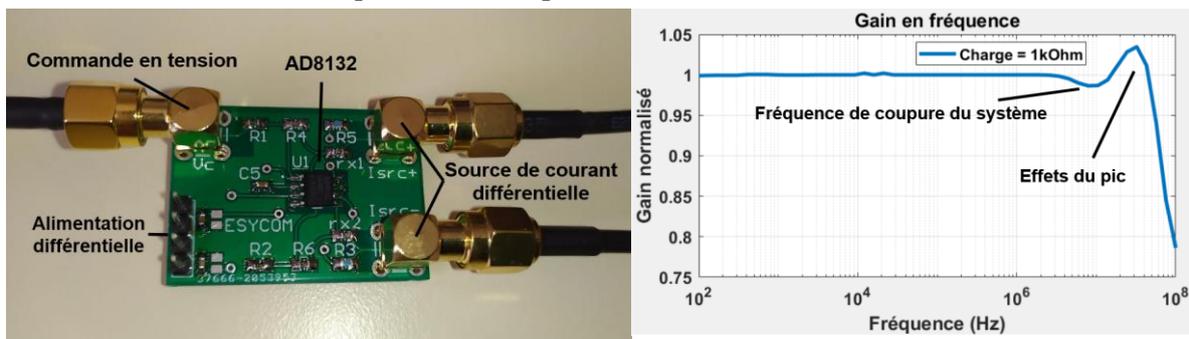


Figure 3. A. Circuit Imprimé pour la source de courant B. Caractérisation en fréquence de la source de courant.

La Figure 3.B4 est la réponse du courant de sortie obtenu en fonction de la fréquence. Elle reflète une réponse stable jusqu'à 20 MHz, qui l'on peut étendre à 40MHz grâce au pic précédemment simulé.

4. Conclusion

La structure originale bas coût de la source de courant présentée, qui a été conçue, réalisée puis testée, permet d'envisager une solution embarquée pour de la caractérisation en impédance de milieux biologiques qui sera présentée dans l'article définitif. De plus, les performances large bande (jusqu'à 40 MHz) la rendent compatible pour de l'excitation bipolaire de tissus neuronaux en liens avec des implants "in-vivo".

5. Références

1. Daniil D. Stupin, Ekaterina A. Kuzina, Anna A. Abelit, et al, "Bioimpedance Spectroscopy: Basics and Applications", ACS Biomaterials Science & Engineering 2021 7 (6), 1962-1986, DOI: 10.1021/acsbomaterials.0c01570
2. Sirtoli, V.; Morcelles, K.; Gomez, J.; Bertemes-Filho, P. Design and Evaluation of an Electrical Bioimpedance Device Based on DIBS for Myography during Isotonic Exercises. J. Low Power Electron. Appl. 2018, 8, 50. <https://doi.org/10.3390/jlpea8040050>
3. Sirtoli, Vinicius G, Morcelles, Kaue F and Vincence, Volney C. "Design of current sources for load common mode optimization" Journal of Electrical Bioimpedance, vol.9, no.1, 2018, pp.59-71. <https://doi.org/10.2478/joeb-2018-0011>
4. Texas Instrument, « Fully Differential Amplifiers Applications: Line Termination, Driving High-Speed ADCs, and Differential Transmission Lines », Application Report, SLYT143-February 2001