

Les Communications Recherche des Chercheurs et des Étudiants en 2023



SOMMAIRE

LES COMMUNICATIONS RECHERCHE DES CHERCHEURS ET DES ÉTUDIANTS EN 2023

La Journée des Chercheurs en Haute École 2023	4
• Projet PuMA	5
• Projet Bridge	6
• Projet Dynalist	7
• Level up	8
• Dispositif d'éducation à l'alimentation saine de base	9
• Projet IndTherm	10
Technologie Beamforming	11
Recherche et développement – Ingénieur électrique - Master bloc 2	13
Capteur d'intensité lumineuse pour la détection des larves de moustiques	14
Radiofréquences dans les environnements domestiques et de bureau	20
Pilote automatique et ordinateur pour véhicule aérien sans pilote	27
Scientific literature – Ingénieur – Bachelier bloc 2	39
Méthodes d'essais non destructifs par thermographie active	40

Les Communications Recherche des Chercheurs et des Étudiants en 2023

La publication de communications scientifiques est cruciale pour la progression de la connaissance scientifique et pour établir la crédibilité des chercheurs dans leur domaine. Elle contribue à la connaissance collective, elle établit la crédibilité et la reconnaissance et surtout elle promeut la collaboration scientifique.

Il est donc important pour la HEPL de former nos étudiants et nos jeunes chercheurs à la communication scientifique. Les étudiants qui apprennent à communiquer efficacement sur leur recherche peuvent contribuer à la diffusion des connaissances dans leur domaine, en partageant leurs résultats avec un public plus large. Cela contribue également à développer leur compétence en communication en général, ce qui peut leur être bénéfique dans leur vie professionnelle et personnelle. Une bonne communication permet aussi de faciliter la collaboration interdisciplinaire, car ils sont mieux en mesure de communiquer avec des chercheurs d'autres domaines.

En tant que coordinatrice de la recherche à la HEPL, je suis heureuse de partager avec vous mon enthousiasme pour le travail remarquable de nos étudiants. Leurs efforts, leur créativité et leur engagement ont abouti à des présentations exceptionnelles !

Cette brochure vous en fournit un bref aperçu avec les abstracts proposés par nos chercheurs à la Journée des Chercheurs en Haute Ecole (JdCHE) organisé par Synhera, les articles de recherche rédigés par les étudiants du Master en ingénieur électronique et le meilleur des abstracts réalisés par les étudiants de 2ème Bachelier en sciences de l'ingénieur.

Bonne lecture !

Nathalie Gerlach, cellule Recherche et Durabilité.

La Journée des Chercheurs en Haute École 2023

C'est ce que l'on peut appeler une véritable réussite ! La Journée des Chercheurs en Haute École, qui s'est déroulée ce 16 mars a rassemblé pas moins de 282 personnes. Une participation record pour cet événement phare du réseau SynHERA.

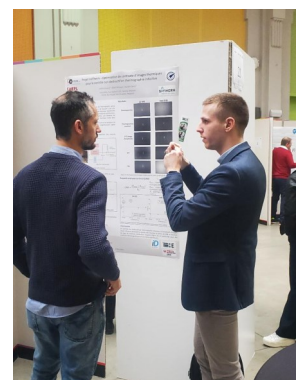
Durant toute la journée, les membres du réseau SynHERA ont eu l'opportunité d'assister à différentes présentations de projets de recherche, sous forme de communications orales ou de communications posters. Au total, ce sont ainsi 70 recherches scientifiques qui,

La HEPL a fortement contribué au succès de cette Journée des Chercheurs en présentant pas moins de 4 posters et 2 présentations orales:

- Projet PuMA — Caractérisation de substrats hautement résistifs par système résonant, de la conception aux tests expérimentaux Jamotton, Elodie ; Scheen, Gilles ; Broun, Valéry ; Brose, Christophe
- Présentation des résultats intermédiaires du Projet Bridge portant sur la notion d'ingénierie sociale – Etudes de cas : Autriche, Belgique, France et Roumanie.
- Projet Dynalist Stassen, Théo
- Level up : L'enseignement à distance et hybride en perspectives locale et globale : étude des rapports entre prescrits et action critique en Haute École lors du confinement et suite à celui-ci. Cocinas Garcia, Amélie ; La Paglia, Vincent; Creten, Alexis
- Mise en place d'un dispositif d'éducation à l'alimentation saine de base dans le cadre du cours d'éducation physique de primaire. Deroux, Laure ; Klinkenberg, Isabelle ; Marteau, Maureen ; Franck, Nicolas
- Projet IndTherm – Choix d'un traitement d'images optimal pour du contrôle non destructif en thermographie inductive Cawez, Arnaud ; Helsen, Denis ; Demy, Philippe

Voici les abstracts de ces présentations.

N'hésitez pas à me contacter si vous souhaitez entrer en contact avec un de nos chercheurs pour approfondir la discussion!



Projet PuMA — Caractérisation de substrats hautement résistifs par système résonant, de la conception aux tests expérimentaux

Jamotton, Elodie¹ (elodie.jamotton@hepl.be) ; Scheen, Gilles^{2, 3} ; Broun, Valéry² ; Brose, Christophe²

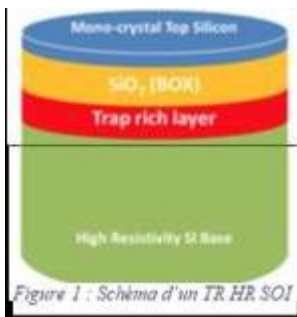
¹ CeCoTePe, Seraing, Belgique

² Haute Ecole de la Province de Liège, Département ingénieur, Liège, Belgique

³ Incize, Louvain-la-Neuve, Belgique

Mots-clés : sans contact, résonance, permittivité, résistivité, semi-conducteur

Le projet PuMA a pour objectif de développer une technique de caractérisation sans contact des substrats complexes de la microélectronique hautes fréquences. Ces substrats sont utilisés comme base pour déposer des circuits électroniques permettant l'émission et la réception de données de réseaux mobiles. Les substrats, ou wafers, utilisés de nos jours sont de plus en plus complexes pour répondre aux contraintes strictes des réseaux mobiles (5G, 6G,...) dont, notamment, l'augmentation des fréquences utilisées. Cette augmentation provoque, entre autre, des pertes plus conséquentes qui sont limitées grâce à des wafers de haute résistivité. Cependant, une haute résistivité ne permet plus d'utiliser les méthodes sans contact existantes pour les caractériser et celles avec contact engendrent des pertes de matériel pour chaque lot à tester.



Un type de substrat complexe fortement utilisé est le « TrpaRich High Resistivity Silicon On Insulator » (TR HR SOI), dont le schéma est représenté à la Figure 1, qui a une résistivité effective de plus de 4 kΩ·cm.

La caractérisation de substrats se fait par la mesure de différents paramètres dont des paramètres physiques tels que la permittivité et la résistivité du substrat. Dans un premier temps, ce projet s'est penché sur une méthode de caractérisation s'inspirant de celle utilisée pour des substrats moins résistifs. Cette méthode utilise les courants de Foucault induits dans le substrat pour en extraire ses propriétés électriques. Elle est exploitée par l'entreprise Sinton Instruments (voir Figure 2). Une étude numérique puis expérimentale a démontré que cette méthode n'est pas adaptée à la caractérisation de substrats hautement résistifs



Figure 2 : appareil de mesure développé par Sinton Instruments

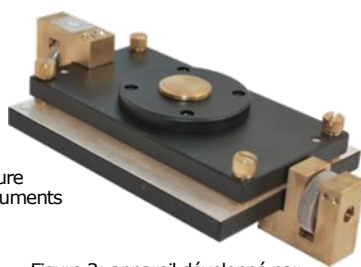


Figure 3: appareil développé par QWED

Une deuxième méthode est en cours d'expérimentation, celle-ci se base sur la résonance de diélectriques. Un équipement de mesure de permittivité et de résistivité développé par l'entreprise QWED, le « Split-Post Dielectric Resonator » (SPDR), est présenté à la Figure 3. Des tests numériques et expérimentaux ont également été effectués pour cette méthode.

Une adaptation du SPDR est en développement pour tendre vers la caractérisation complète de substrats à l'aide d'un appareil unique.

Dans cette communication orale, les différentes étapes du projet PuMA seront présentées et détaillées. Les appareils de mesure et les techniques de caractérisation qui leur sont propres seront expliqués ; les résultats des tests numériques et expérimentaux seront exposés et comparés.

Références

- 1) Sinton Instruments. WCT-120/WCT-120MX-The standard Offline Wafer-Lifetime Tool. Issu de : <https://www.sintoninstruments.com/products/wct-120/> (consulté le 14/10/22)
- 2) QWED. Split Post Dielectric Resonators (SPDR). Issu de : https://www.qwed.com.pl/resonators_spdr.html (consulté le 14/10/22)

Présentation des résultats intermédiaires du Projet Bridge portant sur la notion d'ingénierie sociale – Etudes de cas : Autriche, Belgique, France et Roumanie.

Contor, Justine^{1, 3} (j.contor@helmo.be) ; Maes, Patrick² ; Absil, Gaëtan^{1, 3}

1 Haute École Libre Mosane

2 Haute École de la Province de Liège.

3 LABoCS, Université de Liège.

Mots-clés : ingénierie sociale, innovation sociale, professionnels.les, formation, projet Erasmus+

Dans le cadre de ce projet de recherche financé par Erasmus+, les différents partenaires concernés (Autriche, Belgique, France et Roumanie) travaillent à comprendre, voire définir, ce qui est entendu par notion d'ingénieur/innovateur social.

La méthodologie du projet consiste en l'articulation entre cinq phases de travail : La première phase concerne l'analyse du contexte socio-politique et institutionnel ; La seconde phase porte sur l'analyse approfondie du contenu des formations (curriculum formel et informel) qui concernent les cursus en ingénierie sociale ; 3) La troisième phase du projet vise à confronter les premières analyses aux besoins des professionnels du secteur ; 4) La quatrième phase du projet consiste à définir des possibilités de créer des mobilités entre étudiants.es, enseignants.es-chercheurs.es ; enfin 5) La cinquième et dernière phase du projet a pour objectif de développer un site internet permettant de favoriser la mobilité des stagiaires et professionnels.les vis-à-vis des quatre partenaires du projet. Il va s'en dire que chacune de ces phases sont enchevêtrées et doivent se penser presque en même temps. L'originalité du projet de recherche tient en outre dans le fait que chaque partenaire est impliqué à des niveaux différents en termes d'élaboration de leur formation (certains plus avancés que d'autres). Aussi, chaque partenaire a des points de vue différents sur ce qu'est, ou ce que devrait être, un ingénieur/innovateur social. Alors que certains s'insèrent dans le travail social, d'autres se consacrent plutôt à la santé publique, enfin des partenaires visent plutôt le changement social.

Concrètement, après une brève présentation du projet, notre communication portera spécifiquement sur les premiers résultats de la phase trois : à propos de l'analyse des besoins et des réalités de terrain des acteurs professionnels belges-francophones. En effet, il s'agit de confronter les visions du terrain avec la manière dont les cursus sont pensés et construits au sein de chaque formation. Pour cela, nous mènerons une approche qualitative à travers la mise en œuvre de focus groups réalisés avec des professionnels.les de l'action sociale (décembre 2022). Ces focus groups feront l'objet de retranscription et d'analyse systématique-thématique, dont nous présenterons les résultats intermédiaires.

Références

- 1) Bonetti, M., & de Gaulejac, V. (2019). Ingénierie sociale. (Social engineering – ingeniería social). In Dictionnaire de sociologie clinique (p. 362-365). Érès. <https://doi.org/10.3917/eres.vande.2019.01.0362>
- 2) Bunduchi, R., Smart, A. U., Crisan-Mitra, C., & Cooper, S. (2022). Legitimacy and innovation in social enterprises. *International Small Business Journal*, 02662426221102860. <https://doi.org/10.1177/02662426221102860>
- 3) Ravon, B., & Vidal-Naquet, P. (2018). Les épreuves de professionnalité, entre auto-mandat et délibération collective. *L'exemple du travail social. Rhizome*, 67(1), 74-81.
- 4) Vrancken, D. (2012). Le travail social serait-il devenu une profession ? Quand la « prudence » s'invite au cœur d'un vieux débat. *Pensée plurielle*, 30-31(2-3), 27-36. <https://doi.org/10.3917/pp.030.0025>
- 5) Zahra, S. A., Gedajlovic, E., Neubaum, D. O., & Shulman, J. M. (2009). A typology of social entrepreneurs : Motives, search processes and ethical challenges. *Journal of Business Venturing*, 24(5), 519-532. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2008.04.007>

Projet Dynalist

Stassen, Théo¹ (theo.stassen@hepl.be)

¹ Centre de recherche Technique et Pédagogique (CECoTePe), Haute École de la Province de Liège

Mots-clés : Checklist, Hôpital, Dynamisme, Web-app, User-Friendly

Dynalist est une application créée dans le cadre du projet SLS, lancé par un consortium d'entreprises et de centres de recherche de la région wallonne, en collaboration avec des hôpitaux wallons et français. SLS vise à créer une couche logiciel rassemblant les informations du parcours du patient dans l'hôpital et connectant les différents logiciels déjà existants, gérant le dossier patient, la chirurgie, l'anesthésie, la pharmacie, etc. Le cœur du programme se voit également greffé de modules indépendants développés par les différents partenaires, Dynalist est l'un de ceux-là.

L'apport du CECOTEPE vise à pourvoir des plus-values sur le long terme dans l'optimisation du flux du patient. Un des points faibles dans le flux est lié aux checklists du parcours patient. L'origine de Dynalist vient de la demande des utilisateurs finaux (infirmiers, médecins, etc.) de résoudre les problèmes liés aux checklists. Celles-ci sont entièrement papier, prennent du temps à remplir, sont souvent bâclées, redondantes, ne transmettent pas l'information, etc.

Pour pallier ces problèmes, et suite à une recherche de l'état de l'art, est apparu le concept de "checklist dynamiques" 1,2,3,4, consistant en une checklist composée d'une liste de questions qui dépendant du contexte vont apparaître ou pas lors du remplissage. Concrètement toutes les questions possèdent des conditions d'apparition, qui peuvent dépendre des informations patient (par ex, si le patient est enfant, il n'est pas nécessaire de demander s'il possède un dentier) ou des réponses aux autres questions (par ex., si le patient dit avoir des allergies, lesquelles ? À quel degré ?).

Dynalist est donc une application web appliquant ce concept de checklist dynamique et conçue pour s'interconnecter avec le reste de SLS.

Son utilisation est la suivante : un utilisateur de l'hôpital (infirmier, secrétaire, médecin, etc.), devant remplir la checklist d'un patient, ouvre l'application sur un support de son choix (smartphone, tablette, ordinateur), s'identifie à l'aide de son badge, sélectionne le patient parmi la liste des patients en attente (obtenue en direct par la connexion avec SLS), identifie le patient à l'aide de son badge, sélectionne la checklist à remplir pour ce patient, remplit celle-ci, en profitant au maximum du dynamisme des questions pour gagner du temps, et valide quand la checklist a été remplie (elle est alors stockée). Le patient peut alors continuer son parcours.

Toutes les fonctionnalités développées dans Dynalist permettent de résoudre les problèmes soulevés par les utilisateurs finaux et d'améliorer in fine le fonctionnement de l'hôpital.

Références

1) Nan, Shan, Pieter Van Gorp, Hendrikus H M Korsten, Richard Vdovjak, Uzay Kaymak, Xudong Lu, et Hui-long Duan. « Tracebook: A Dynamic Checklist Support System », 2015, 4. <https://doi.org/10.1109/CBMS.2014.33>.

2) De Bie, A.J.R., S. Nan, L.R.E. Vermeulen, P.M.E. Van Gorp, R.A. Bouwman, A.J.G.H. Bindels, et H.H.M. Korsten. « Intelligent Dynamic Clinical Checklists Improved Checklist Compliance in the Intensive Care Unit ». *British Journal of Anaesthesia* 119, no 2 (août 2017) : 231-38. <https://doi.org/10.1093/bja/aex129>.

3) Lu, Xudong. « A Meta-Model for Computer Executable Dynamic Clinical Safety Checklists », 2017, 14. <https://doi.org/10.1186/s12911-017-0551-0>.

4) De Bie, Ashley J.R., Eveline Mestrom, Wilma Compagner, Shan Nan, Lenneke van Genugten, Kiran Delli-more, Jacco Eerden, et al. « Intelligent Checklists Improve Checklist Compliance in the Intensive Care Unit: A Prospective before-and-after Mixed-Method Study ». *British Journal of Anaesthesia* 126, no 2 (février 2021): 404-14. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2020.09.044>.

Level up : L'enseignement à distance et hybride en perspectives locale et globale : étude des rapports entre prescrits et action critique en Haute École lors du confinement et suite à celui-ci.

Cocinas Garcia, Amélie¹ (amelie.cocinasgarcia@hepl.be) ; La Paglia, Vincent² ; Creten, Alexis²

¹ Haute École de la Province de Liège

² Haute École de la Ville de Liège

Mots-clés : (techno) pédagogie, hybridation, innovation, glocalisation, numérique

La crise du COVID-19 a précipité l'installation d'une culture d'e-learning et d'hybridation au sein des pratiques pédagogiques, en particulier dans l'enseignement supérieur. Cependant, contrairement aux modèles communément admis, (Charlier, Deschryver, & Peraya, 2005) elle ne s'est pas réalisée dans la durée par une négociation graduelle, mais bien selon les modalités d'un passage rapide et contraint par l'épidémie relevant souvent de l'emergency remote teaching (Hodges et al., 2020).

Malgré des déséquilibres et défauts évidents, ce point d'inflexion (Nünning & Sicks, 2012) a permis et acté le développement de pratiques innovantes inspirées de la technopédagogie à un rythme et dans une quantité inégalés. De plus, il a également marqué un moment social et psychologique dans la légitimation et l'acceptation des technologies de l'éducation.

La sortie de la situation de confinement ne semble pas annoncer un retour à une situation antérieure, mais bien la consolidation des avancées rapides effectuées et une nécessaire régulation des innovations enregistrées. Ces réflexions pédagogiques visent donc à savoir « que retenir de cette implémentation soudaine et quelle(s) orientation(s) elle porte pour nos futures pratiques d'enseignement ? ».

Pour répondre à ce questionnement, il est nécessaire d'étudier les prescrits technopédagogiques développés durant la crise du Covid, et leur réception critique et mise en place pratique. D'une part, cela nous permettra d'identifier, évaluer et théoriser scientifiquement les changements aux niveaux local et global. D'autre part, nous valoriserons les ressources et potentialités par l'optimisation, la mutualisation et le développement de formations continues avec d'autres institutions. Les trajectoires de recherche et de valorisation seront donc intimement liées.

Nous suivrons une approche guidée par la théorie (theory driven, Deterding & Waters, 2021), selon une méthodologie mixte : qualitative et quantitative.

Celle-ci se déclinera en trois grandes étapes :

A. Une enquête auprès d'experts (techno)pédagogiques de divers établissements d'enseignement supérieur afin de compiler les stratégies pédagogiques et institutionnelles prescrites.

B. La soumission des résultats du point a. lors de focus-groupes avec des enseignants et des étudiants, apportera un éclairage du terrain dans l'optique de l'explicitation d'un corpus de « critique de la théorie » (Boltanski, 1990: 131).

C. Ce corpus de théorie critique sera ensuite analysé pour identifier, formaliser et valoriser les dynamiques locales de réponse à un problème global (Mandinach, 2008: 148).

L'objectif principal de notre projet est de comprendre, modéliser et optimiser le changement à l'œuvre pour pérenniser l'innovation pédagogique et guider la transformation numérique efficiente des organisations d'apprentissage et d'enseignement par les facteurs pédagogiques, technologiques, organisationnels, ainsi que ceux qui relèvent de l'affect.

L'identification de ces facteurs permettra l'optimisation et la mutualisation des formations développées par les cellules numériques et pédagogiques et l'acculturation des enseignements à distance et hybrides en Haute École.

Références

- 1) Boltanski L. (1990). Sociologie critique et sociologie de la critique. In: Politix, vol. 3, n°10-11, Deuxième et troisième trimestre 1990. Codification(s) sous la direction de Bastien François et Jean-Philippe Heurtin. pp. 124-134. doi : <https://doi.org/10.3406/polix.1990.2129>
- 2) Charlier, B., Bonamy, J. & Saunders, M. (2003). Apprivoiser l'innovation. In B. Charlier et D. Peraya (Ed.), Technologie et innovation en pédagogie : dispositifs innovants de formation pour l'enseignement supérieur (pp. 43-64). Bruxelles, Belgique: De Boeck.
- 3) Deterding, N. M., & Waters, M. C. (2021). le coding of in-depth interviews: A twenty-first-century approach. Sociological methods & research, 2), 708-739.

Mise en place d'un dispositif d'éducation à l'alimentation saine de base dans le cadre du cours d'éducation physique de primaire.

Deroux, Laure1 ; Klinkenberg, Isabelle1 ; Marteau, Maureen1 ; Franck, Nicolas1 (Nicolas.Franck@hepl.be)

1 Haute École de la Province de Liège

Mots-clés : Surpoids, inactivité physique, éducation à la santé, éducation physique, enseignement.

Surpoids et obésité, inactivité physique, alimentation inadéquate constituent la réalité d'un grand nombre de famille dans le monde et en Belgique (Bouglé, 2005 ; Drieskens, 2018 ; Organisation Mondiale de la Santé, 2017). L'école étant l'un des plus importants lieux de vie de l'enfant, il s'agit d'un lieu propice à la sensibilisation à ces problématiques de santé publique. C'est dans ce sens qu'une réforme de l'enseignement axée notamment sur cette thématique a été adoptée par la Fédération Wallonie-Bruxelles (Pacte pour un Enseignement d'Excellence). À la suite de cette réforme, le professeur d'éducation physique devient « professeur d'éducation physique, à la santé et au bien-être ». Celui-ci se voit donc attribuer de nouvelles compétences et missions relatives à la santé et au bien-être comme la nutrition ou l'hydratation (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2021).

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre une enseignante en éducation physique et une spécialiste de diététique. Il a pour objectif de mettre en application ces nouvelles missions d'éducation à la santé qui incombent désormais au professeur d'éducation physique. L'idée est d'associer l'engagement moteur et la pratique d'activité physique à l'acquisition de connaissances relatives à l'alimentation et la nutrition. Au cours des 6 semaines d'expérimentation avec une classe de 4^{ième} primaire, de nombreuses activités physiques (gymnastique, course, manipulation de ballons, ...) ont permis d'aborder de manière ludique des notions théoriques importantes (classes d'aliment, répartition de ces aliments dans l'assiette et proportions relatives, composition de collations saines, ...). Les connaissances et les habitudes alimentaires des élèves ont été évaluées au début et à la fin du dispositif via un questionnaire de connaissances. Un transfert vers les parents, facteur indispensable des habitudes alimentaires des enfants, a été organisé via un travail à domicile à la moitié de l'expérimentation (Office de la naissance et de l'enfance, 2019).

Au terme de l'expérimentation, nous avons pu constater une progression globale (augmentation de la moyenne des connaissances des élèves de 40% à 67%) ainsi qu'une progression individuelle de 13 des 16 élèves. Il est important de noter que ces apprentissages sont ancrés puisque les documents utilisés lors de l'expérimentation le sont toujours. Étant entendu que chaque professeur d'éducation physique devra aborder des notions d'éducation à la santé, il s'agit d'une méthode applicable pour un large panel de classes et d'élèves. Plusieurs enseignants pourront dès lors puiser des pistes de mise en œuvre du nouveau référentiel dans ce travail.

Références

1) Office de la naissance et de l'enfance (ONE). (2019). Chouette, on passe à table ! Consulté le 05 04, 2022, sur Office de la naissance et de l'enfance: https://www.one.be/fileadmin/user_upload/siteone/PARENTS/Brochures/Brochure-chouette-on-passe-a-table-2020.PDF

Bouglé, D. (2005). L'obésité chez l'enfant. Consulté le 05 04, 2022, sur Cairn.info: <https://www.cairn.info/revue-enfances-et-psy-2005-2-page-9.htm>

2) Drieskens, S. (2018). Habitudes nutritionnelles 2018. Consulté le 05 04, 2022, sur Sciensano: https://www.sciensano.be/sites/default/files/nh_report_2018_fr_v3.pdf

3) OMS. (2017, 10 11). En 40 ans, les cas d'obésité chez l'enfant et l'adolescent ont été multipliés par dix. Consulté le 05 04, 2022, sur Organisation mondiale de la santé: En 40 ans, les cas d'obésité chez l'enfant et l'adolescent ont été multipliés par dix (who.int)

Fédération Wallonie-Bruxelles. (2021). Référentiel d'éducation physique et à la santé. Consulté le 05 08, 2022, sur Enseignement.be.

Projet IndTherm – Choix d'un traitement d'images optimal pour du contrôle non destructif en thermographie inductive

Cawez, Arnaud^{1, 2} (arnaud.cawez@hepl.be) ; Helsen, Denis^{3, 4} ; Demy, Philippe^{1, 2})

1 Haute Ecole de la Province de Liège (HEPL)

2 Centre de Coopération Technique et Pédagogique (CeCoTePe)

3 Institut de Recherche de l'Institut Supérieur Industriel de Bruxelles (IRISIB)

4 Haute Ecole Bruxelles-Brabant (HE2B)

Mots-clés : traitement d'images ; contrôle non destructif ; thermographie inductive ; fissure ; acier.

La recherche de défauts dans les pièces mécaniques revêt une importance capitale, aussi bien pour le contrôle qualité des pièces de production que pour le contrôle des pièces en service. Différentes méthodes de contrôle non destructif existent pour déceler la présence de défaut à la surface d'une pièce inspectée. L'une d'entre elles, la thermographie inductive, permet de détecter des discontinuités dans la matière par chauffage inductif. Cette technique présente des avantages comme une interprétation aisée des résultats et une mise en œuvre écologique.

Le contraste thermique n'est cependant pas toujours suffisant pour une caractérisation précise du défaut. Dans le cadre du projet IndTherm, quatre algorithmes numériques usuels en thermographie ont été développés et testés sur deux échantillons métalliques, l'acier 15-5PH et l'acier inoxydable 316L possédant un défaut calibré de type crique de surface. Ces traitements d'images sont :

- Soustraction d'image froide ;
- Transformée de Fourier rapide (FFT) ;
- Thermographie aux composantes principales (PCT) ;
- Reconstruction du signal thermographique (TSR).

Pour un matériau ferromagnétique comme le 15-5PH, un traitement par FFT est plus adapté avec un rapport contraste-sur-bruit (CNR) pouvant être multiplié jusqu'à 1,5 fois par rapport aux images non traitées. Pour un matériau non ferromagnétique comme l'acier inoxydable 316L, le contraste est également multiplié par 1,5 avec le traitement par PCT. Ils permettent également de mettre en évidence l'échauffement du défaut via un contraste positif par rapport au bruit.

En conclusion, selon le matériau utilisé et ses propriétés physiques, dans les mêmes conditions de tests, un traitement d'images particulier donnera un meilleur contraste permettant une caractérisation plus précise d'un défaut. Des traitements d'images adaptés au type de matériau inspecté pourront ainsi être envisagés dans le cadre d'une sélection automatisée d'images traitées en vue d'améliorer la caractérisation des défauts.

Références

- 1) Georges, M. Contrôle non destructif champ complet. Techniques et applications. CMOI-FLUVISU, 2017
- 2) Helsen, D. ; Cawez, A, et al., Etude comparative de détection de criques par thermographie inductive pour des alliages métalliques industrielles, 2021
- 3) Maldague X. et Marinetti, S; Pulse phase infrared thermography. Journal of Applied Physics, 1996
- 4) Bison P., et al., Active thermography with frequency modulated source, 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference, 2018
- 5) Rajic N., Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures. Composite Structures, 2002

Étude et développement de la technologie Beamforming sur Zynq UltraScale+ RFSoc Projet MANARADIO

Guillaume Martin¹, Antoine Brune¹, Valéry Broun², Christophe Brose³

¹Manakeen, Angleur, Belgique

²Haute Ecole de la Province de Liège, Département ingénieur, Liège, Belgique

³CECOTEPE, Seraing, Belgique

Mots-clés : Beamforming, Traitement du signal, FPGA, 5G, *Software Defined Radio*

Le *beamforming*, ou formation de faisceaux en français, est une technologie avancée de traitement du signal. Elle permet de concentrer le signal dans l'unique direction souhaitée en utilisant un réseau de plusieurs antennes proches les unes des autres diffusant le même signal à des moments légèrement différents. On parle alors de réseau d'antennes à commande de phase, le délai temporel étant équivalent à un décalage de phase [3]. En concentrant le signal dans une direction spécifique, le *beamforming* permet une meilleure qualité de signal au niveau du récepteur [4].

Avec le temps, les besoins dans le domaine des télécommunications imposent une augmentation des fréquences de signaux. Cependant, les hautes fréquences sont plus rapidement atténuées, ce qui diminue la portée des équipements [5]. Pouvoir focaliser la puissance émise offre une solution à ce problème. Ceci implique en pratique qu'une communication utilisant le *beamforming* sera plus rapide et plus fiable qu'une autre ne l'utilisant pas (à puissances d'émission égales).

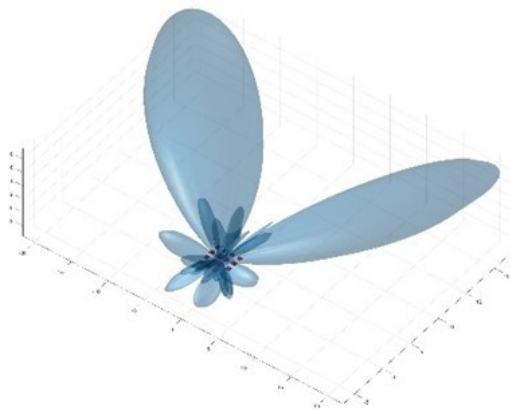


Figure 1: Image d'illustration du beamforming

La présente technologie est déjà appliquée dans les réseaux modernes (5G, Wi-Fi 6). Elle est en plein essor et ses domaines d'application potentiels sont nombreux [4]. Le projet MANARADIO a pour but de développer un système de *beamforming* pour optimiser la communication entre une base fixe et un élément mobile. Il est financé par la Région wallonne et est développé en collaboration entre Manakeen SRL et le CeCoTePe.

La méthodologie consiste dans un premier temps en la réalisation d'un état de l'art afin de comprendre les principes généraux du *beamforming* et de prendre le contrôle des équations analytiques qui le contrôlent. Des modélisations et simulations sur le logiciel *Matlab* ont permis de visualiser les diagrammes de radiation des réseaux d'antennes utilisant le *beamforming* [1].

Dans un second temps, des recherches sur les architectures matérielles ainsi que les cartes de développement permettant l'implémentation du *beamforming* ont été menées et ont permis de sélectionner une carte de développement de dernière génération (Xilinx ZCU216 Zynq UltraScale+ RFSoc) [1]. Cette dernière contient un FPGA offrant 16 canaux de transmission pouvant fonctionner à très haute fréquence (6 GHz) et supportant un réseau d'antennes de dimensions 4x4 [2].

Ensuite, le développement d'un modulateur et d'un démodulateur sur la ZCU216 permettra de générer les signaux à transmettre et d'implémenter le *beamforming*. La majorité des développements effectués seront numériques, on parle alors de *Software Defined Radio (SDR)*. La validation du développement sera ensuite effectuée en chambre anéchoïque.

Nous proposons de montrer dans cette communication les enjeux de notre projet en se focalisant sur les principes de base du *beamforming* accompagnés des résultats des simulations ainsi que sur le matériel technologique utilisé.

Références

- [1] Brune, A. (2021). *Étude et développement de la technologie Beamforming sur Zynq UltraScale+ RFSoc*. Travail de fin d'études, Haute École de la Province de Liège.
- [2] Xilinx (2020). *ZCU216 Evaluation Board User Guide*, UG1390 (v1.1). Disponible à : <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug1390-zcu216-eval-bd> (consulté le 11 octobre 2022)
- [3] Milligan, T. A. (2005). *Modern Antenna Design* (seconde édition). Wiley-IEEE Press.
- [4] Cadence (2020). *5G Communications Featuring Cadence AWR Software*.
- [5] de Dieuleveult, F. et Romain, O. (2017). *Électronique appliquée aux hautes fréquences : principes et applications*. L'usine nouvelle, Dunod.

Cours 'Recherche et Développement' en Master bloc 2— Ingénieur électronique



Dans le cadre de leur formation dans le Master en Sciences de l'ingénieur en électronique, les étudiants ont l'occasion de rédiger un article scientifique, ce qui est pour eux une activité passionnante et gratifiante!

Cela peut sembler intimidant au départ, mais c'est une expérience incroyablement enrichissante pour les étudiants qui y participent.

Tout d'abord, la rédaction d'un article scientifique nécessite une recherche approfondie, ce qui signifie que les étudiants ont l'opportunité d'explorer des sujets qui les passionnent vraiment. Cela peut être une occasion idéale pour eux de développer une expertise dans un domaine particulier.

Ensuite, le processus de rédaction en lui-même peut être incroyablement stimulant pour l'esprit. Les étudiants doivent travailler sur leur argumentation afin de créer un texte clair et précis qui présente des informations utiles pour la communauté scientifique.

Cela peut être difficile mais lorsque les étudiants y parviennent, c'est une source de grande fierté et de satisfaction.

Enfin, cette expérience peut avoir un impact durable sur leur carrière et leur vie professionnelle. Je suis toujours impressionnée par les étudiants qui se lancent dans ce type de projet, et j'ai hâte de voir les grandes choses qu'ils accompliront à l'avenir.

Study of a light intensity sensor for mosquito larvae measure and detection

A.Hertay¹, L.Petitjean¹

¹Haute Ecole de la Province de Liège (HEPL), electronic and embedded systems, Liège Belgium

January 2023

Abstract

To help mosquito researcher and farmers, this article provides a way to measure and detect mosquito larvae using a light intensity sensor. The measurement method is based on a real time and fully automated system on a STM32 microcontroller. The measurement system consists of a reservoir containing the larvae, a tube with a reduced cross-section that matches the size of a single larva, and a light intensity sensor to detect them. This method shows that it is possible to detect a larva using an intensity sensor and propose a method to measure their size. This proof of concept can be further studied to improve its accuracy.

1. Introduction

The bioengineering department at the University of Liège, Gembloux is studying the reaction of mosquito and mosquito larvae to different environments. One parameter they study is the size of the mosquito larvae, as this can indicate the quality of their growth[1]. Larvae go through four growing stages, called instars, each of which corresponds to a specific size. Currently, the size of mosquito larvae is measured manually. In order to automate this process, researcher J. Carpentier has requested a system that can measure and detect mosquito larvae in real time. In this article, we investigate the feasibility of such a system based on a light intensity sensor. Previous articles, including "The efficiency of a new automated mosquito larval counter and its impact on larval survival" [2] and "Project Wolbachia - Singapore" [3], have employed similar methods using a reservoir, a tube with a reduced cross-section, and a light intensity sensor. These articles evaluate the efficiency of their system but do not give any technical details about them. In comparison, this article addresses the technical issues of building such system by using widely available and cheap parts.

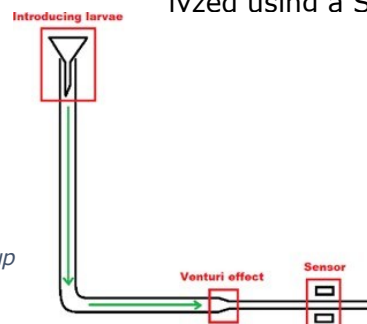
2. Methods

Important: Being unable to obtain live larva to conduct our test, all the tests in this article were conducted with larvae lookalike. These larvae lookalike is made of a less than 1mm thick string of wool. Therefore, when this article refers to larvae, this article refers to larvae lookalike. See a picture of the larva lookalike below in Fig[1].



Figure 1 : Picture of larvae lookalike used to simulate larvae in our article, ruler displays in metric system (cm).

Figure 2 : Schematic of our measurement setup



Our measurement setup (Fig[2]) consists of a reservoir, a tube with a reduced cross-section, and a light intensity sensor. To calibrate the light intensity sensor, we followed the procedures outlined later in this article. Data was collected and analyzed using a STM32 microcontroller.



Figure 3 : Picture of our measurement setup

We decided to use a simple light dependent resistor (LDR) sensor [4], also called a photoresistor, for the following reasons: it is easy to set up, cheap, accurate, and has fast response. Its rising time is 18ms when only a 10lux variation happens and its falling time is 120ms for the same variation [4]. A photoresistor is a passive component that decreases in resistance when exposed to light. When a constant light source is applied to the sensor, the resistance of the sensor remains constant. Therefore, if an obstacle obstructs the light that reaches the sensor, the sensor's resistance increases.

The first consideration is ensuring that the photoresistor only receives light from the desired source. This can be achieved by isolating the light source and sensor from external interferences using a 3D-printed (Fig[4,5,6,7]) piece that consists of:

- A channel that holds the tube through which the larvae flow
- A compartment that holds the photoresistor
- A compartment that holds the light source

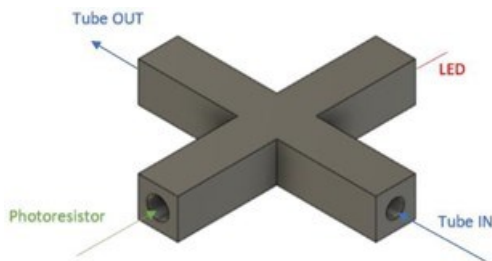


Figure 4 : Overview of the 3D-printed piece elaborated.

L	60mm
l	10mm
D1	5mm
D2	4,5mm
d	3mm

Figure 5 : dimension of the 3D-printed piece.

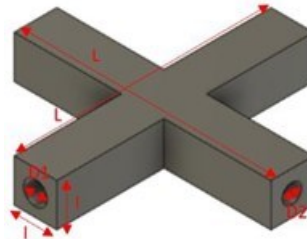


Figure 6 : Overview of the 3D-printed piece elaborated to isolate the light sensor and the light emitted beam from external interferences.

The second consideration is controlling the amount of light fed to the sensor. This is important because it allows the light emitted by the light source to be directed into a beam that is narrow enough to only cover the zone in the tube where the larvae flow. Without this consideration, the light emitted could pass through the thickness of the tube, resulting in false positives. To achieve this, we designed a 3D- printed piece with a reduced cross-section in the channel that directs the light toward the sensor.

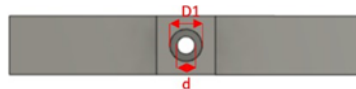


Figure 7 : Overview of the reduced cross-section.

The third consideration is measuring the variation in resistance of the photoresistor. This can be done using a simple circuit as shown in Fig[8] and a STM32 microcontroller. The method used is to measure the voltage drop induced by the variation in the photoresistor's resistance. When an object obstructs the light received by the photoresistor, the photoresistor's resistance increases, causing a drop in voltage. This voltage is measured using the STM32 microcontroller's ADC with a sample frequency of 150kHz, allowing for precise measurement of the larvae.

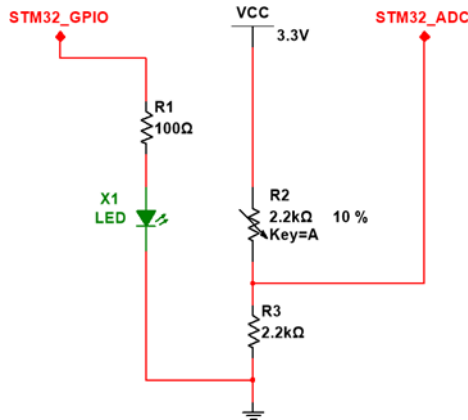


Figure 8 : electrical wiring of the photoresistor and light emitter to the STM32 microcontroller.

The fourth consideration involves the theoretical background used to develop the transfer function between the ADC measurement and the size of a larva. By applying a constant flow rate in a tube with a known cross-section, the speed of the mosquito larva can be calculated by treating it as the speed of the fluid. This allows for the size of the larva to be determined.

$$v[m/s] = \frac{Q[m^3/s]}{\frac{\pi d^2}{4} [m^2]}$$

$$Size_{Larva}[m] = \frac{N_{sample} * v[m/s]}{F_{sample} [1/s]}$$

Figure 9 : Proposed transfer function to compute larva size according to the number of samples measured below a fixed threshold with a fixed flow rate.

$v[m/s]$	Speed of larva
$Q[m^3/s]$	Flow rate
$d[m]$	Tube cross-section
$Size_{Larva}[m]$	Larva size
$F_{sample}[1/s]$	Sample frequency
N_{sample}	Number of samples measured*

*The number of samples measured is the number of samples measured below a fixed threshold with the frequency F_{sample}

3.Results & discussions

All tests were conducted with a constant flow rate according to the previously described transfer function.

The first chart (Fig[10]) shows the measurement of a constant flow of clean water. We can see that the measurement remains constant, with a 0.66% variation due to the sensitivity of the sensor. At the end of the chart, there is a larger variation due to the end of the water flow. The end of the water flow induce air and water bubbles. These bubbles modify the transmission profile of the light in the system. When a water bubble passes in front of the sensor, we can clearly see a decrease in intensity. This is the reason why all the measurements must be made with a constant flow of water

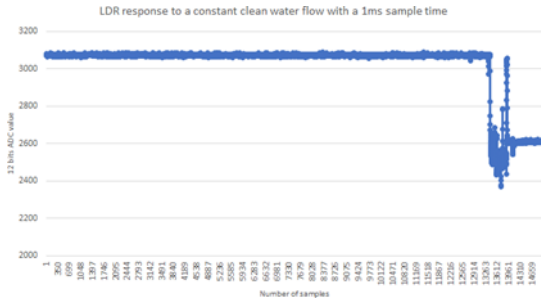


Figure 10 : LDR response to a constant clean water flow with a 1ms sample time. Y-axis: 12bit value measured on the ADC, X-axis: Number of samples measured.

The next chart (Fig[11]) shows the measurement of 2 larvae in a constant flow of water. We can see a clear change in intensity when a larva is detected, with two distinct peaks.

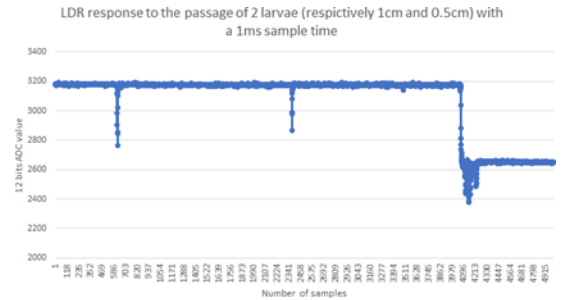


Figure 11: LDR response to the measurement of 2 larvae (respectively 1cm and 0.5cm) in a constant water flow with a 1ms sample time. Y-axis: 12bit value measured on the ADC, X-axis: Number of samples measured

The next (Fig[12]) chart shows a zoomed-in view of one of the peaks observed in the previous chart. We can see that there are 5 samples that read below the 3000 threshold line, which is used to confirm that the larva is in front of the sensor.

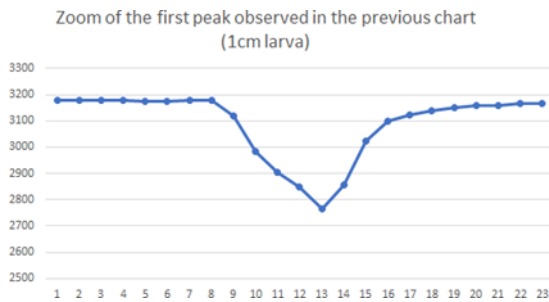


Figure 12 Zoom in of the first peak observed in the previous chart, 5 samples can be seen below the 3000 threshold line.

We repeated the measurement with larvae of various sizes and obtained the following results (Fig[13])

Larva size (cm)	Number of points below the threshold line	Larva size using the proposed transfer function(cm)
0.4	1	0.07
0.5	3	0.21
0.6	3	0.21
1	5	0.35
1.5	8	0.56

Figure 13 : Table of the number of points below the 3000 threshold line according to the size of larva at a sample / time of 1ms.

To improve precision, we repeated the measurements with a smaller sample time of 0.5ms and obtained the following results (Fig[14]) :

Larva size (cm)	Number of points below the threshold line	Larva size using the proposed transfer function(cm)
0.4	4	0.14
0.5	6	0.21
0.6	7	0.24
1	11	0.38
1.5	16	0.56

Figure 14 : Table of the number of points below the 3000 threshold line according to the size of larva at a sample time of 0.5ms.

When analyzing the tables above, we made the following observations:

- 1.Reducing the sample time improved the sensitivity of the system.
2. The number of samples consistently increases when measuring a larva between 0.5 cm and 1.5 cm.
3. The number of samples did not double when lowering the sample time by a factor of 2, in fact, the system's resolution seems to be finer.
4. The proposed transfer function (Fig[9]) does not accurately measure larva size. It appears that the accuracy of the results increases when the sample time is reduced.

To further improve the accuracy of the proposed transfer function, the next tests were conducted with a sample time of 10.8 μs, or 92 KHz. Due to the large number of samples that need to be analyzed, the next tests were conducted in real-time without being able to store the data. The algorithm we used is represented in the following flow chart (Fig[15]) :

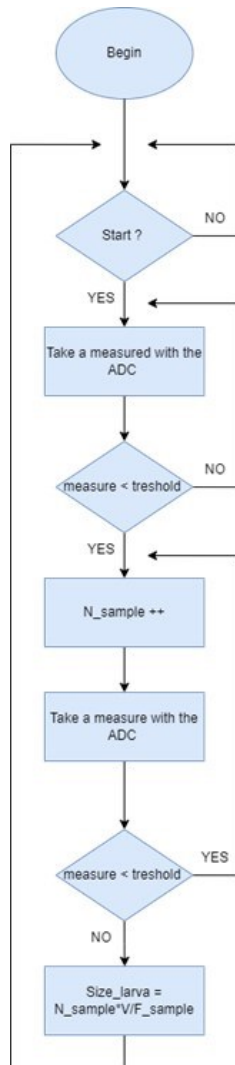


Figure 15 : Flow chart of the Algorithm that we used to evaluate the transfer function with a sample time of 10.8 μs

In the bellow table of Fig[16], we observe that an increase in sample frequency enhanced the system's accuracy.

Larva size (cm)	Number of points below the threshold line	Larva size using the proposed transfer function(cm)
0.4	44282	0.334
0.5	55949	0.422
0.6	74908	0.565
1	106595	0.804
1.5	131653	0.993

Figure 16 : Table of the number of points below the 3000 threshold line according to the size of larva at a sample time of 10.8μs.

To evaluate the repeatability of our system, larvae from the same size were repeatedly measured. These results can be observed in Fig[17].

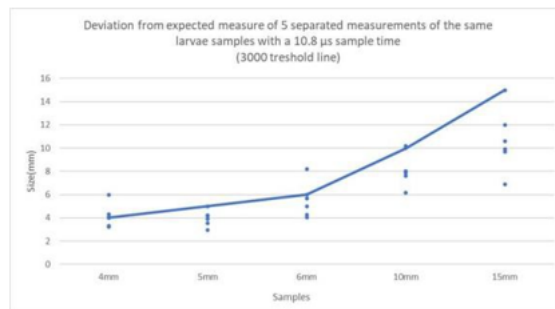


Figure 17 : Plot that shows the deviation from expected measure of 5 separated measurements of the same larvae samples with a 10.8 μs sample time with a 3000 threshold line. X-axis: 5 different larvae measured with different size, Y-axis: value measured for each sample.

We observed a deviation between 2 to 4 mm. This large deviation could be explained by an imprecision in the measurement of the larvae introduced to conduct this test.

Therefore, we conducted a repeated measure of the same sample. We observe a maximum disparity of 0.5 mm and conclude that our system is robust. These results can be observed in Fig [18].

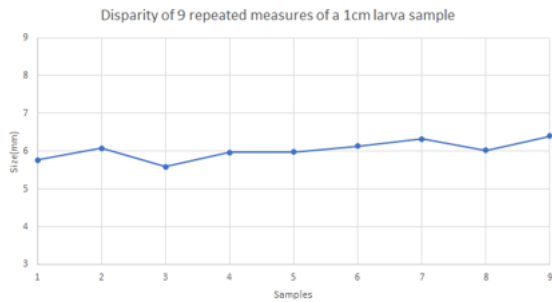


Figure 18 : Disparity of 9 repeated measures of a 1cm larva sample. X-axis: 9 measures of the same larvae, Y-axis: value measured for each sample.

Seeing that the system is robust, we decided to reduce the threshold level from 3000 to 3100, or 97% of the final value read with a constant water flow. This will allow the system to count more points and improve its results :

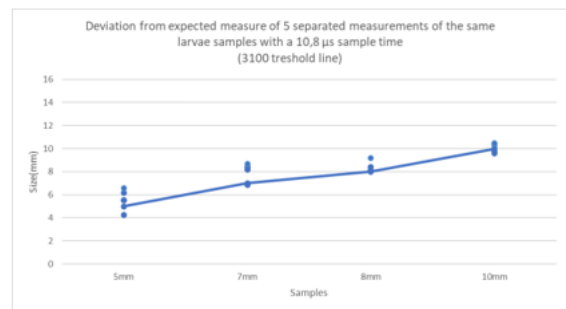


Figure 19 : : Plot that shows the deviation from expected measure of 5 separated measurements of the same larvae samples with a 10.8 μs sample time with a 3100 threshold line. X-axis: 5 different larvae measured with different size, Y-axis: value measured for each sample.

4. Conclusion

In conclusion, this study has demonstrated the feasibility of using a light intensity sensor to measure and detect mosquito larvae in real time. A proof of concept of a fully automated system was developed using a STM32 microcontroller and a light dependent resistor sensor. The system can detect and measure the larva but shows a lack of accuracy in its measurement.

To further improve its accuracy, different technologies of light intensity sensors should be evaluated. We believe that a sensor with a better response time [4,5,6] can increase the accuracy of this system.

Another improvement that can be made is measuring the water speed during the measurement and use this real time measure in our transfer function instead of using a constant previously measured.

5. References

- 1) Krida Ghazi, Rhaiem Adel, Jarraya A., Bouattour Ali. Morphologie comparée des quatre stades larvaires de Culex (Culex) pipiens Linné récolté en Tunisie (Diptera, Culicidae). In: Bulletin de la Société entomologique de France, volume 103 (1), mars 1998. pp. 5-10; Fichier pdf généré le 23/03/2022
- 2) The Efficiency Of A New Automated Mosquito Larval Counter And Its Impact On Larval Survival, W.Mamai,H. Maiga, M. Gárdos, P. Bán, N. S. Bimbilé Somda, A. Konczal, T. Wallner, A. Parker, F. Balestrino, H. Yamada, J. R. L. Gilles & J.
- 3) Evolution of automated systems for large- scale rearing of male wolbachiaedes mosquitoes for project Wolbachia – Singapore.
- 4) https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/LDR%20Datasheet.pdf, visited the 17-01-2023.
- 5) <https://www.farnell.com/datasheets/2572441.pdf>, visited the 4-01-2023.

Radio Frequency Harvesting in domestic and office settings: State of the art and perspectives

A. Munoz Quiroz¹, C. Laurent¹

¹Haute École de la Province de Liège (HEPL), electronic and embedded systems, Liège, Belgium

January 2023

ABSTRACT

Radio Frequency (RF) energy harvesting is the method where the least amount of energy can be harvested compared to solar, vibration and thermal harvesting. There are more and more RF emissions on different frequencies and much of this energy is wasted because it is often emitted omni-directionally. By harvesting this energy, low-power devices could be continuously powered. In this context, we present a study based on two development boards from E-peas for energy harvesting at 2.45 GHz, corresponding to the Wi-Fi band that is deployed worldwide, and at 868 MHz which is an open band (in Belgium) where we find home automation, etc. This article aims to show as much information as possible about energy harvesting with different input powers, and the possible consumption of the output power depending on the storage capacity.

I. Introduction

Nowadays, there are more and more radio frequency emissions all over the world. These emissions are used for many different applications and are also at different frequencies. The frequency plan changes depending on the country but remains mostly in the same frequencies for major radio frequency applications, there are Wi-Fi bands operating at 2.45 GHz / 5 GHz, GSM bands operating at 900 MHz / 1800 MHz, FM bands operating between 87 MHz and 108 MHz, and many more. Most of these sources are emitted omni-directionally, so there is a lot of energy wasted due to non-reception by any device. That's why it would be nice to be able to harvest this energy for low-power applications [1].

Some low-power applications that currently run on batteries, however, may only run on energy harvesting. One of the main advantages is that the RF energy received continuously due to a very large number of radio frequency transmitters. Depending on where you are, outside or inside, the powers that can be received are different. It is therefore important to know where the application should be located. In a domestic environment, there are often one or more Wi-Fi routers that emit in general 100 mW (20 dBm) in all directions.

This paper aims to provide a study on the reliability of RF Harvesting in a domestic environment. Several tests were carried out on development boards of the supplier E-peas operating at 2.45 GHz and 868 MHz in order to show the efficiency of these with different loads and different energy storage capacities.

II. Different Types of Energy Harvesting

There are several types of energy harvesting where each of them works under certain conditions and with different efficiency. It is possible to harvest energy from the environment using vibration/motion energy, thermal energy, light or RF radiation. Table 1, summarizes the power output that could be obtained from its various environmental sources using optimized devices

Source	Source power	Harvested power
Ambient light		
Indoor	0.1 mW/cm ²	10 μW/cm ²
Outdoor	100 mW/cm ²	10 mW/cm ²
Vibration/motion		
Human	0.5 m @ 1 Hz 1 m/s ² @ 50 Hz	4 μW/cm ²
Industrial	1m @ 5 Hz 10 m/s ² @ 1 kHz	100 μW/cm ²
Thermal energy		
Human	20 mW/cm ²	30 μW/cm ²
Industrial	100 mW/cm ²	1 - 10 mW/cm ²
RF		
Cell phone	0.3 μW/cm ²	0.1 μW/cm ²

Table 1: Characteristics of different ambient energy sources and power harvesting. [2]

Depending on the environment, some solutions are more suitable than others. The outdoor light outperforms all other energy sources. However, the harvesting energy studied in this article, that is RF energy, is the weakest source and the smallest amount of energy that can be harvested. The RF sources depend on the types of radio frequencies one wishes to harvest. Table_1 shows us for a cell phone source, but many other sources are available at different power levels, so Wi-Fi will be strongly emphasized in our tests.

As far as other sources are concerned, indoor light is comparable to thermal energy and vibrations, and the industrial environment is more favorable in relation to the energy around the body.

III. Radio Frequency energy harvesting

To harvest RF energy, as shown in Figure 1, a specific circuit consisting of one or more antennas, a matching circuit, an RF rectifier and optionally an energy storage element must be implemented. Then we find a voltage regulation in order to supply a low power application and if necessary, a management of the energy storage charging. [3]

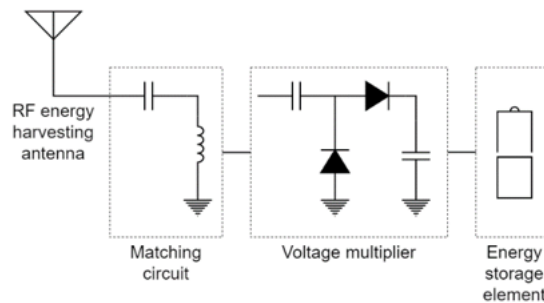


Figure 1: A general architecture of an RF energy harvester. [4]

The following are the main elements:

The first stage is the antenna, which collects the RF signals. Depending on its type, the antenna is designed to operate at a certain frequency, in broadband or in multiple frequency bands. However, to recover energy at different frequencies, several antennas with different matching circuits will offer better results.

The second step is impedance matching, which is a resonant circuit operating at the intended frequency to maximise power transfer. This circuit is designed to stay close to the characteristic impedance (often 50 Ohms) in order to have the best SWR.

The third stage is the voltage multiplier, which consists of rectifier circuit diodes that convert RF signals (AC signals) into DC voltage. This type of circuit is often a Greinacher circuit.

The last stage, which may be optional, is the storage of the received energy. Ideally, if the application always consumes less than the energy received, there is no need to use storage. However, the storage system is rarely removed due to power peaks during transmission, sensor use, or other consumption, as shown in Figure_2. In addition, energy harvesting may be absent at certain times. The storage system can be a battery, a capacitor, a supercapacitor, etc.

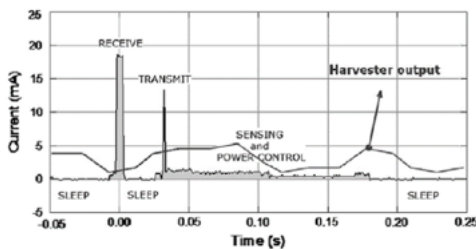


Figure 2: A typical scenario for the power consumption of a sensor node. [2]

Depending on the frequency on which we work, between transmission and reception there is a loss of power in the air. The harvested RF power of a transmitter in free space can be calculated on the basis of the Friis equation (without reflection, interference, etc.) as follows:

$$PP_{rr} = GG_{rr} \cdot GG_{tt} \cdot PP_{tt} \cdot \frac{\lambda\lambda}{4 \cdot \pi \cdot dd}^2$$

Where PP_{rr} is the received power, PP_{tt} is the transmitting power, GG_{tt} is the linear transmitting antenna gain, GG_{rr} is the linear receiving antenna gain, $\lambda\lambda$ is the wavelength emitted and dd is the distance between the transmit antenna and the receiver antenna.

This equation can also be put into a logarithmic form which is as follows:

$$PP_{rr} = PP_{tt} + GG_{rr} + GG_{tt} - 20 \log(ff) - 20 \log(dd) + 147.5$$

Where PP_{rr} is the received power in dBm, PP_{tt} is the transmitting power in dBm, GG_{tt} is the linear transmitting antenna gain in dBi, GG_{rr} is the linear receiving antenna gain in dBi, ff is the emitted signal frequency and dd is the distance between the transmit antenna and the receiver antenna.

Table 2 shows the application of the Friis equation at different frequencies for a constant transmission of 0dBm with a 2dBi transmitting and receiving antenna at a distance of 1 metre.

Transmitting power: 0 dBm - Antennas: 2 dBi - Distance: 1m				
Frequency	868 MHz	915 MHz	2,45 GHz	5 GHz
Received power	-27.22 dBm	-27.67 dBm	-36.23 dBm	-42.43 dBm

Table 2: Application of the Friis equation, with different frequencies

This result shows that the higher the frequency, the higher the power loss in the air. Low frequencies are more efficient than high frequencies in RF harvesting. Furthermore, the higher the frequency, the harder it is to create circuits and antennas to receive the energy, and therefore the lower the efficiency.

IV. E-peas solutions test

To evaluate the efficiency of energy harvesting, we decided to experiment with the development boards from E-peas [5]. The choice to take boards from E-peas, is explained by the fact that he offered development boards for standardized frequency.

Fidelity (Wi-Fi) was able to run the development board (both boards just have different antenna matchers). By putting on two Wi-Fi routers and on the E-peas board antennas, with 5 dBi gain, placed at less than 5 cm, the losses are so big that it was not possible to activate the output voltage (in less than 4H).

To verify that the Wi-Fi routers are working properly, an ambient emission level test has been performed. This test was done with a Wi-Fi analyzer such as "Acrylic Wi-Fi Analyzer". As you can see in the Figure 3 both routers are generally to -15 to -20 dBm and the other ambient Wi-Fi range from -50 to -88 dBm.

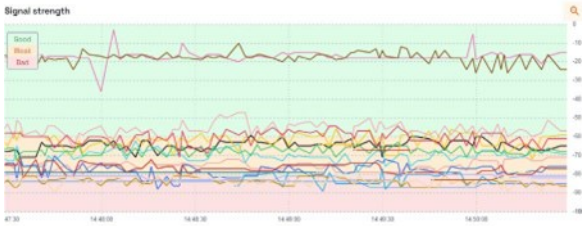


Figure 3: Graph of Wi-Fi power

Based on its first results, but also on the characteristics of the cards from E-peas (minimum input power of -20 dBm), the possibilities of using as a source of energy the Wi-Fi of a company or domestic will not be viable with these cards, since the sources and receiver must be too close.

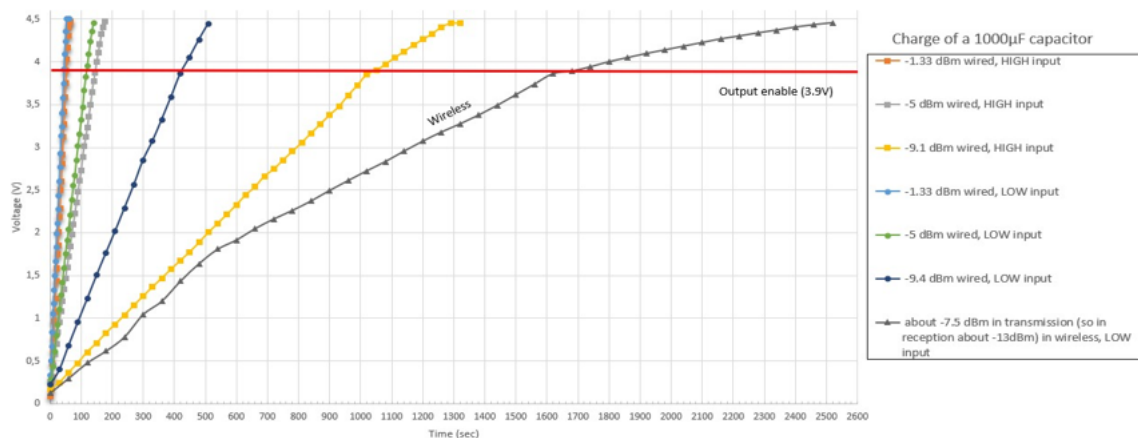


Figure 4: Charge of a 1000 μ F capacitor (2.45 GHz)

The purpose of the research is to be able to characterize the boards and see the possibilities of it. The second test was to know the time it takes to charge a 1000 μ F capacitor with different powers received at the input of the 2.45 GHz board. The results represented on the [Figure_4](#) show how the capacitor charges according to different powers and according to the inputs¹. The signals sent are continuous and not in bursts, like Wi-Fi. The results obtained are linear², no matter the power received.

NB: The tests for signals above 0 dBm have not been performed because the equipment for this study did not allow it.

Another important parameter is to know the time of use when the capacitor has been charged completely before. The [Figure 5](#) shows the result time that the user can expect according to the current required (output voltage chosen was 1.8 V, but can be from 1.2 V to 3.3 V).

The last test describes, with the [Table 3](#), the maximum current that can be used to make the system work permanently and not to have active and sleep phases for the system supplied by the board from E-peas.

¹ The high input is designed for signals from -10 to 10 dBm and the low input for signals from -20 to 0 dBm.

² The output was activated only from 3,9 V, continues to charge the capacitor until 4,5 V and disables the output if it is below 3,5 V.

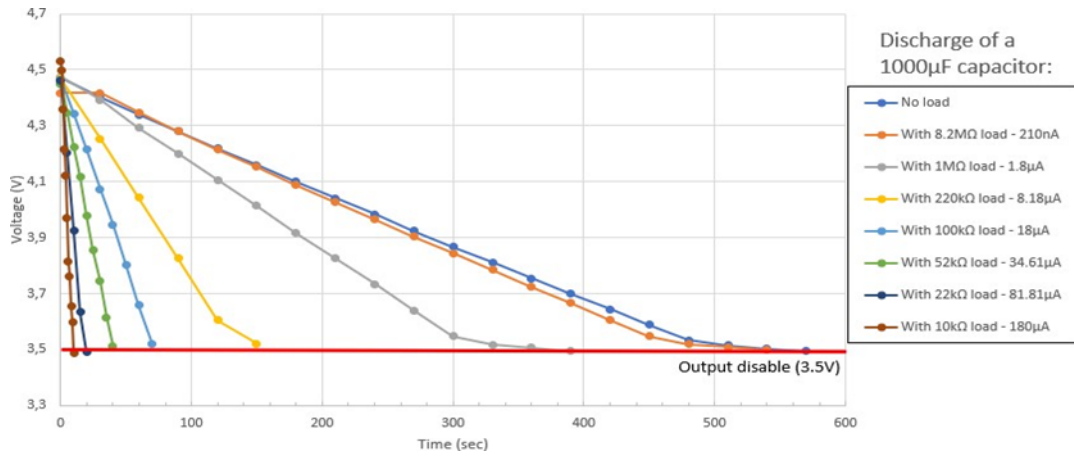


Figure 5: Discharge of a 1000 µF capacitor (2.45 GHz)

There was no other test on the 2.45 GHz board, but as mentioned in point 4 of this article and by Mr. Damien B. [6], the lower the frequency of use, the lower the power required to transmit. That's why it was important to test the 868 MHz board. The test of the charging time of a 1000 µF capacitor is shown in the Figure 6 and, as stated in the E-peas documents, the efficiency of the 868 MHz board is greater, as it can reach 65% compared to 55% for the 2.45 GHz.

As for the capacitor discharge test and the test with the change to a capacitor twice as big for the 868 MHz board, they are not relevant, because the difference between the boards is just in the matching circuit and not in the voltage multiplier and the energy storage circuit.

In addition to the same finding from E-peas [6], other problems on the use of ambient Wi-Fi for an IoT project were highlighted by E-peas, such as:

- The Wi-Fi does not work continuously but sends data in a burst.
- The more we increase the frequency of use, the more the source must emit a strong power if we want to recover the same power at the receiver.
- "Classic" Wi-Fi routers are designed to emit 100 mW (20 dBm), whereas it would take 1 W (30 dBm) to be viable with the receiver at 1m distance. Because, to be higher than the threshold of -20 dBm required by the board to be activated.

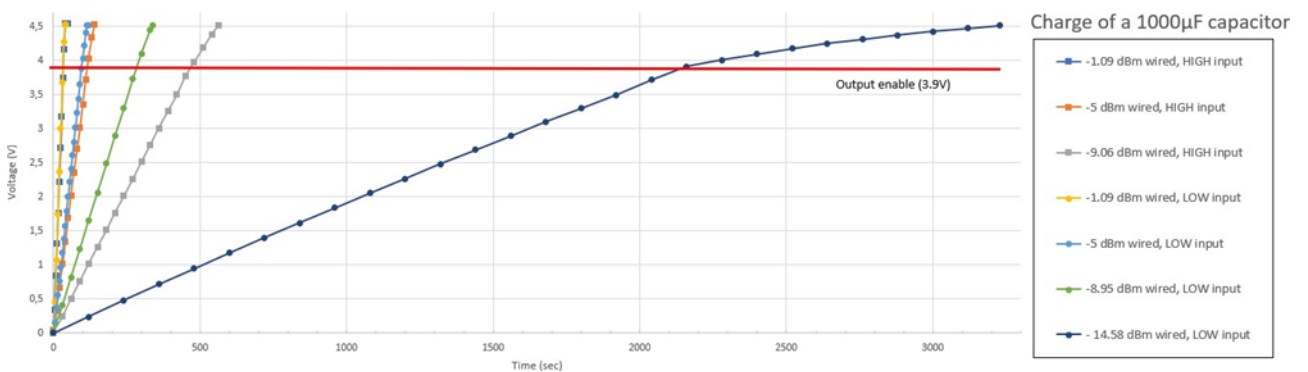


Figure 6: Charge of a 1000 µF capacitor (868 MHz)

V. Important points for the use of RF harvesting

Like the ambient Wi-Fi network supplies not sufficient power, the RF harvesting technique could work if we control the source.

If the source allows to receive sufficient power, there are different important points to consider to have a viable application:

- Having a coherent storage system according to the charge/discharge time and the capacity to store energy is essential! Based on the Figure 7, which represents a Ragone diagram [7], the super/ultracapacitor is a good compromise to have a dynamic charging system, with sufficient available energy for the IoT.
- Having a system that consumes as little as possible is important to increase the time that the IoT can operate without having to set up wake- up and sleep phases [8].
- A low-power data storage system reduces its impact on system efficiency. A data storage system, with an RFID system to read data and receive power, that can accept another power supply when the data is ready, regardless of whether the energy storage system is recharged, is an important consideration. An example is the ST25DV64KC system [9].

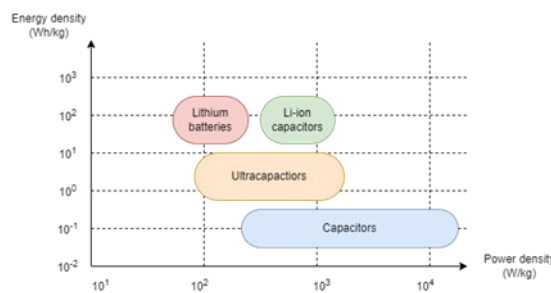


Figure 7: Ragone diagram

VI. Conclusion

This article explored if RF harvesting could be used without source control and in which case the E-peas boards could be efficient. The first tests on the possibility to use the ambient 2.45 GHz Wi-Fi waves, which can be found in a house, in an office,... were not conclusive since the power levels collected by the boards, at a distance close to the transmitter (less than 5 cm), are not sufficient to activate the RF harvesting boards from E-peas. This implies that the implementation of a RF harvesting system must require a very specific attention on the power levels. Moreover, this power level must be in accordance with the regulations of your country. Regarding the comparison of the two E-peas boards (2.45 GHz and 868 MHz), the 868 MHz board has a better yield since there is more received power for the same transmission power. This energy harvesting is due to lower losses in the environment when the operating frequency is reduced.

Finally, if the power levels are sufficient to operate systems of this kind, it is always necessary to think about the overall yield of the installation, and to see if another energy harvesting technique is not more interesting from a yield point of view, but also about the ease of implementation.

VII. Acknowledgment

The authors would like to thank the 'Haute École de la Province de Liège' for its support, but also the teachers of the electronics section (Mr. Brose C., Mr. Scheen G., Mr. Spirlet M., Mr. Libotte H.).

References

- [1] S. Rajdevinder, S. U. Jagpal and A. Alpana, A Survey Study of Different RF Energy Sources for RF Energy Harvesting, India: ResearchGate, 2009.
- [2] R. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof and R. Mertens, Micropower energy harvesting, AE Eindhoven: Elsevier, 2009.
- [3] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. In Kim and Z. Han, Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey, Singapore: IEEE, 2014.
- [4] M. Deepak, D. Swades, J. Soumya, B. Stefano, C. Kaushik and H. Wendi, Smart RF Energy Harvesting Communications: Challenges and Opportunities, IEEE Communications Magazine, 2015.
- [5] E-PEAS, "AEM30940 - RF Energy Harvesting," [Online]. Available: <https://e-peas.com/product/aem30940/>. [Accessed 30 9 2022].
- [6] E-PEAS (Bruno Damien), "Harvesting RF Energy in 3 Steps," 29 7 2022. [Online]. Available: <https://e-peas.com/news/harvesting-rf-energy-in-3-steps/>. [Accessed 1 11 2022].
- [7] W. Qianghong, L. Ying, L. Lingyang, M. Pantrangi, K. Long and R. Fen, Anode Material of Vanadium Nitride for Supercapacitors: A Topic Review, Lanzhou: Journal of Materials Chemistry A, 2020.
- [8] T. Latinovic, C. Barz, P. P. Petrica and V. P. Adina, Harvesting energy an sustainable power source, replace batteries for powering WSN and devices on the IoT, Romania: IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017.
- [9] ST, "ST25DV64KC - Dynamic NFC/RFID tag IC with 64-Kbit EEPROM, and fast transfer mode capability," 23 6 2021. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/nfc/st25dv64kc.html>. [Accessed 15 10 22].

Autopilot and companion computer for unmanned aerial vehicle: Survey

L. Delvaux¹, L. Di Naro¹

¹Haute Ecole de la province de Liège (HEPL), electronic and embedded systems, Liège Belgium

January 2023

Abstract— The popularity of drones has grown rapidly in recent years. Recently, more and more projects have been conducted by amateurs and academics. In this research, one element allows the drone to be able to stabilise itself and fly according to predefined trajectories: the autopilot. Of course, there are many different autopilots. This article is a study of the different existing autopilots. In this article, a comparison of the different autopilots that make up the Pixhawk autopilot range was conducted. In order to increase the capabilities of these autopilots, a companion computer can be added to the system. This companion computer allows a specific mission to be carried out. In the following, communication between the Pixhawk and the companion computer will be implemented via the MAVLink protocol.

I. INTRODUCTION

Nowadays, public interest in UAVs (unmanned aerial vehicles) is growing steadily. A large number of projects are being developed from UAVs all around the world in many different fields. These range from UAVs delivery [1] projects to industrial safety [2], but also for military applications [3]. This increasing in the number of projects is mainly due to the democratization of UAVs.

There are many of off-the-shelf drones available on the market. These drones are often easy to use, even for someone without any experience. These UAVs are used by many photographers or are used to visualize an area. However, not all UAVs are capable of flying autonomously.

Whether it is a simple remote-controlled UAV or a fully autonomous UAV, electronic boards have been developed to make these machines more intelligent and easier to control. These boards, which are called "autopilot" are becoming more and more complex and incorporating more and more features. These systems are able to help or even completely replace the human pilot.

The autopilot [4] is a system consisting of software and hardware to control the UAVs (or any other vehicles that can be remoted). To do this, the autopilot uses different sensors such as an IMU (inertial measure unit), a barometer and sometimes a GPS. In addition, it can generate motor control signals and receive RF instructions.

The computational capabilities of the autopilot alone limit the possible application of the drone. Therefore, it is interesting to add a companion computer [5] that will make the UAV more flexible. This means that the drone can be programmed accordingly to suit the requirements of the user.

The communication with the drone is done via a protocol called MavLink (Micro air vehicle communication protocol). This protocol follows a modern hybrid publish-subscribe and point-to-point design pattern. It is also used for communication between the companion computer and the autopilot.

II. AUTOPILOT

A. Role of the autopilot

An autopilot is an on-board system that allows an aircraft to fly and navigate autonomously, without human intervention. It uses flight control algorithms and sensors to maintain the aircraft's altitude, speed and flight path, following predefined flight instructions or reacting to changing flight conditions. The autopilot can be used to perform routine flight tasks in an automated manner, allowing the pilot to concentrate on other tasks, such as mission management or communication with air traffic control. Autopilots are commonly used in airliners and military aircraft [6], but they are also used in other types of autonomous vehicles, such as drones and spacecraft.

The autopilot is a closed-loop control system that has two parts, the state observer and the controller. The state observer part allows to read the data coming from the sensors and the GPS and to determine the altitude, the speed, the position and the inclination of the drone [7]. Then, these data will pass through a PID regulation to provide the commands for the motors. Figure 1 shows the functional structure of an autopilot.

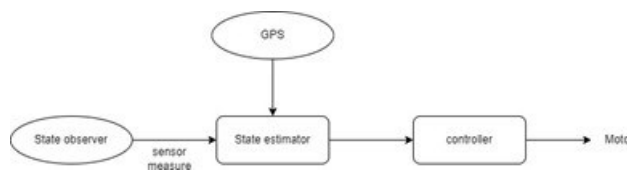


Figure 1: Function structure of an autopilot (reproduced from [7]).

In general, the autopilot includes a microcontroller, an IMU, a barometer and various communication ports. The microcontroller allows the autopilot to perform all the calculation part and interface the input and output. The IMU is composed of a three-axis accelerometer and a three-axis gyroscope and a magnetometer. The IMU allows to obtain all the acceleration and position data of the drone.

B. Existing projects

There is a very large number of autopilots available on the market. In this section, several off-the-shelf autopilots will be presented and compared.

- NAVIO 2 autopilot [10]: The navio 2 project is an integration of a GNSS receiver, power modules and sensor modules [9]. This project allows to transform the raspberry into an autopilot. It has been developed by the company EMLID and costs about 200\$. The shield of Navio 2 has the following sensors and interfaces:

- * 2 redundant IMU
- * 1 high resolution barometer
- * Glonass/GPS/Beidou receiver
- * UART, I2C and A ADC for extensions
- * PPM/SBus input
- * 14 PWM servo output.

In fact, the NAVIO 2 project uses the processor of the raspberry Pi for the calculation part. In the case of a raspberry Pi 3, CPU will be a 64 bits quad-core ARMv8 with a clock frequency of 1.2Ghz. This raspberry has 1Gb of RAM. Moreover, the shield has an IO/co-processor for RC command and the activation of PWM output.



Figure 2: Shield Navio 2.

Navio 2 is a project that allows the implementation of high-level algorithms such as obstacle avoidance, image processing, ...

- Snapdragon Flight Autopilot [11] [12]: Developed by Qualcomm, the snapdragon flight autopilot project offers an autopilot with a very powerful CPU and two onboard cameras. Indeed, the system is based on a Snapdragon 801 on chip system which has a quad core Krait CPU clocked at a frequency of 2.26GHZ, a DSP, and a Qualcomm Adreno GPU. The CPU has a RAM of 2GB. The card has the following sensors and interfaces:

- * 1 IMU
- * 1 Barometer
- * 2 camera videos
- * 1 GNSS receiver
- * I2C
- * 1USB 3.0
- * Wi-Fi 4 & Wi-Fi 5
- * Bluetooth
- * Slot SD card
- * Many others interface ...

Snapdragon flight autopilot allows the implementation of high-level algorithms such as obstacle avoidance and visual odometry [9]. In addition, this autopilot is equipped with cameras with a resolution of up to 4K, which can be streamed via the numerous connections that the autopilot has.



Figure 3: Snapdragon flight autopilot.

- VOXL 2 autopilot [13]: developed by modalIA and costs about 1000\$, this autopilot is designed to integrate artificial intelligence directly into the drone. The VOXL2 combines a companion computer and an autopilot. This board has the following sensors and interfaces:

- * 2 redundant IMUs
- * 2 redundant barometers
- * 5G/4G

The main argument of this card is the capacity of the neural network that it embeds. Indeed, this card has 1 NPU of 15 TOPS which is allied with a GPU and a CPU 8 cores clocked at more than 3.091GHz.



Figure 4:VOXL 2.

- OcPoC (Octogonal Pilot on Chip system) Autopilot [9][20] : Developed by Xilinx, OcPoC is an autopilot that uses the power of the FPGA to perform tasks in parallel, allowing it to have a higher computational and input/output capacity than others. This board has the following sensors and interfaces:

- * 2 redundant IMU
- * 1 barometer
- * GNSS receiver (GPS, Glonass and Beidou)
- * Ethernet
- * Many others interface ...

The OcPoC autopilot is based on a system on chip which consists of a microcontroller and an FPGA part. The FPGA part of the OcPoC is an Artix 7 with 28k logic elements. The CPU is a dual core ARM A9 clocked at 667MHz



Figure 5: OcPoC autopilot.

The advantage of combining an FPGA with a microcontroller is that the FPGA can quickly and in parallel perform the IO and image processing, while the microcontroller can perform the calculation and software.

Even if all these autopilots are interesting and have undeniable advantages. We decided to work for the project on a type of autopilot based on a well-known STM32, the "PixHawk". This brand is the most used in the literature and the most readily available. Therefore, we will make a comparison of the PixHawk range.[19]

- The "Radiolink Pixhawk" is a Chinese branded "Pixhawk" that is quite diverse in its specifications. [14][20] It has a main processor that makes the main regulation calculations and a co-processor that allows it to manage external communications. These specifications include:

- * 2 telemetry ports,
- * 1 accelerometer
- * 1 magnetometer
- * 1 gyroscope
- * 1 barometer
- * Clock frequency : 168 MHz
- * Flash memory : 2 MB
- * RAM memory : 256 KB
- * Dimensions: 82.2 x 51.8 x 16.5
- * Many other interfaces ...



Figure 6: Radiolink Pixhawk.

mm

- The "Holybro Pixhawk" 4 is an American-made autopilot with a more powerful processor than the "Radiolink" and a co-processor that also handles external communications. [15] It is interesting to know that it has an additional GPS with an integrated compass. The Holybro Pixhawk 4 includes:

- * 2 telemetry ports,
- * 1 GPS + integrated magnetometer
- * 2 accelerometers
- * 1 magnetometer
- * 2 gyroscopes
- * 1 barometer
- * Clock frequency : 216 MHz
- * Flash memory : 2 MB
- * RAM memory : 512 KB
- * Dimensions: 44 x 84 x 12 mm
- * Many other interfaces ...



Figure 7: Holybro Pixhawk 4.

The "Holybro Pixhawk 4 Mini" is a lighter version of the previous autopilot as here, there is no co-processor and there are some peripherals missing. [16] Much used in the field of drone racing, it is appreciated for its minimalist size. Here are its main features:

- * 1 telemetry ports,
- * 1 GPS + integrated magnetometer
- * 2 accelerometers
- * 1 magnetometer
- * 2 gyroscopes
- * 1 barometer
- * Clock frequency: 216 MHz
- * Flash memory: 2 MB
- * RAM memory: 512 KB
- * Dimensions: 38 x 55 x 15.5 mm
- * Many other interfaces ...



Figure 8: Holybro Pixhawk 4 Mini.

The "Black Cube" from "Cubepilot" (previously known as "Pixhawk 2.1") is an autopilot from the wide "Cube" family. [17] Their distinctive feature is to separate on one hand the connectors to the outside (telemetry, various interfaces, power port,...) and on the other hand the cubic box containing all the embedded electronics contained in any standard autopilot. The cubic container is designed in order that the vibrations caused by the drone's motors are strongly attenuated. In addition, the 'Cube' is equipped with triple redundancy for the IMUs (distributed in different places in the housing) in such a way that the inertial situation of the drone is reflected as accurately as possible. They also all have 2 barometers. Here are the different characteristics of the "Black Cube":

- * 2 telemetry ports,
- * 3 accelerometers
- * 3 magnetometers
- * 3 gyroscopes
- * 2 barometers
- * Clock frequency: 180 MHz
- * Flash memory: 2 MB
- * RAM memory: 256 KB
- * Dimensions :
- * Cube : 38.25mm x 38.25mm x 22.3 mm
- * Carrier : 94.5mm x 44.3mm x 17.3 mm
- * Many other interfaces ...



Figure 9: Hex Cube Black.

This range of "Cube" is differentiated first of all by the colour of the "Cube", but above all by the performances they can have. In fact, the most powerful of them, the "Orange Cube", can reach frequencies of 400 MHz while having a RAM memory of 1 MB!

The Holybro Pixhawk 6C is one of Holybro's most powerful autopilots. With its 3 telemetry ports and high clock rate, it is equipped with a high-performance processor. [18] It is one of the latest autopilots to be released. This autopilot includes :

- *3 telemetry ports
- *2 accelerometers
- *1 magnetometer
- *2 gyroscopes
- *1 barometer
- *Clock frequency : 480 MHz
- *Flash memory : 2 MB
- *SRAM memory : 1 MB
- *Dimensions: 84.8 x 44 x 12.4 mm
- *Many other interfaces ...



Figure 10: Holybro Pixhawk 6C

C Comparison of Pixhawk

The objective of this research was also to choose the autopilot according to various parameters that fit with our project, such as:

- * Its price,
- * Its interfacing,
- * Its weight/dimensions,
- * Its capacity to receive orders from the outside via an external processor (preferably on the STM32 platform).

A comparison table has been done with all of the presented Pixhawk regarding to their main specifications (see Table 1).

In regard to these different considerations, and in the light of the research done on the subject, the choice has been made for the "Radiolink Pixhawk".

Indeed, the mandatory requirements for the development part were the following:

- * Use of an external computer driver (companion computer),
- * 2 telemetry ports (simultaneous acquisition of altitude, speed, angular position, etc., on the companion computer and on GCS (Ground Control Station) via an external antenna),
- * Use of the "MAVLink" communication protocol,
- * Library to be used open source.

For the last point, it should be noted that all the aforementioned Pixhawk autopilots were all licensed under the BSD (Berkeley Software Distribution) licence and were hence all open sources.

Board and version	Telemetry inputs	Main Processor	Co-Processor	Sensors	GPS	Weight/dimension	Mean price
Pixhawk 1 -Radiolink Pixhawk (v2)	2	32 Bit Arm® Cortex®-M4, 168 MHz, 2MB memory, 256 k RAM + Co-processeur (failsafe) STM32F1	Co-processeur (failsafe) STM32STMF100	Accel/Gyro:MPU6000 , Magnetometer:IST8310, Barometer: MS5611	/	Carrier: 94.5mm x 44.3mm x 17.3mm, 38 g	207.8\$
Pixhawk 4 (v5)	2	32 Bit Arm® Cortex®-M7, 216MHz, 2MB memory, 512KB RAM	32 Bit Arm® Cortex®-M3, 24MHz, 8KB SRAM	Accel/Gyro: ICM-20689, Accel/Gyro: BMI055 or ICM20602, Magnetometer : IST8310, Barometer: MS5611	blox Neo-M8N GPS: GLONASS receiver + Magnetometer : IST8310	44 x 84 x 12 mm, Plastic case: 33.3g; Aluminium: 49g	190\$
Pixhawk 4 mini (v4)	1	32 Bit Arm® Cortex®-M7, 216MHz, 2MB memory, 512KB RAM	/	Accel/Gyro: ICM-20689, Accel/Gyro: BMI055 or ICM20602, Magnetometer: IST8310, Barometer: MS5611	blox Neo-M8N GPS: GLONASS receiver + Magnetometer : IST8310	38 x 55 x 15.5 mm, 37.2g	159\$
Pixhawk 2 - Hex Cube Black (v3)	2	32 Bit Arm® Cortex®-M4, 168 MHz, 2MB memory, 256KB RAM	Co-processeur (failsafe) STM32F103	Accel Gyro/Magnetometer: MPU9250, Accel Gyro/Magnetometer: ICM20602, Accel Gyro/Magnetometer: ICM20948, Barometer (x2): MS5611	/	Cube: 38.25mm x 38.25mm x 22.3mm, Carrier: 94.5mm x 44.3mm x 17.3mm, 32.8 g	354.47\$
Pixhawk 6C (v6)	3	32 Bit Arm® Cortex®-M7, 480MHz, 2MB memory, 1MB SRAM	32 Bit Arm® Cortex®-M3, 72MHz, 64KB SRAM	Accel/Gyro: ICM-42688-P Accel Gyro: BMI055 Mag: IST8310 Barometer: MS5611	/	84.8 x 44 x 12.4 mm, 59.3g, 59.3 g	222,99\$

Table 1: Comparative table of autopilots

For our application, the Pixhawk 4 has some interesting capabilities. It has an integrated GPS and a new generation FMU, all this for a reasonable cost. In addition, it has 2 redundant IMUs which allows for greater accuracy.

The Pixhawk 4 mini is not suitable for our application as it has only one telemetry port. Finally, the Pixhawk 2 and the 6C are more expensive. Even though their FMUs are more recent, they do not have any particular advantage over the PixHawk 4.

III. DEVELOPMENT

The development includes the handling of the communication protocol "MAVLink" in order to be able to interpret various data coming from the autopilot. This data must be understood by the companion computer in order for it to act according to the pre-programmed points of passage.

A. MAVLink

1) Transport and communication protocol

The MAVLink protocol provides communication between the UAVs and other systems such as the GCS or the Integrated Driver. MAVLink serialises system status messages and commands in a dedicated binary format. As a result, the MAVLink protocol is a very lightweight protocol.

Furthermore, the companion computer must also be able to react accordingly to obstacles such as those found inside a building. Indeed, the drone must be able to fly indoors in the best conditions of safety for itself, and especially for the people.

The MAVLink protocol [21], by its construction in rather light structures, is advantageous because it makes it compatible with various types of physical layer (OSI model). These include Wi-Fi, Ethernet, but also and in particular serial communication. The latter allows the highest transmission speed of over 250 kbp/s. Tests performed during development have shown that the telemetry port (serial port) can be used at a speed of 921.6 kbit/s!

There are 2 versions of MAVLink, this article will introduce version 2.0 of this protocol. As shown in Figure 11, MAVLink 2.0 has 11 fields.



Figure 11: Frame of MAVLink v2.

As shown in table 2, a MAVLink message starts with a start byte which is 0xFD. Then it contains the size of the message. It also contains a compatibility flag and an incompatibility flag. The incompatibility flag affects the structure of the message and indicates whether certain functionality should be considered when analysing the packet. Then, the compatibility flag does not affect the structure of the message and can refer, for example, to a flag indicating the priority of the message. Then in the frame, we find the sequence number, the system ID, the component ID. The frame also contains an MSGID field which defines the type of message. This is coded on 24 bits which offers 16777215 possible types. Then, the frame contains the Payload. Finally, there is a checksum for the integrity of the message and an optional signature field to guarantee the inviolability of the message.

Byte Index	C version	Content	Value	Explanation
0	uint8_t magic	Packet start marker	0xFD	Protocol-specific start-of-text (STX) marker used to indicate the beginning of a new packet. Any system that does not understand protocol version will skip the packet.
1	uint8_t len	Payload length	0 - 255	Indicates length of the following payload section. This may be affected by payload truncation.
2	uint8_t incompat_flags	Incompatibility Flags		Flags that must be understood for MAVLink compatibility (implementation discards packet if it does not understand flag).
3	uint8_t compat_flags	Compatibility Flags		Flags that can be ignored if not understood (implementation can still handle packet even if it does not understand flag).
4	uint8_t seq	Packet sequence number	0 - 255	Used to detect packet loss. Components increment value for each message sent.
5	uint8_t sysid	System ID (sender)	1 - 255	ID of system (vehicle) sending the message. Used to differentiate systems on network. Note that the broadcast address 0 may not be used in this field as it is an invalid source address.
6	uint8_t compid	Component ID (sender)	1 - 255	ID of component sending the message. Used to differentiate components in a system (e.g. autopilot and a camera). Use appropriate values in MAV_COMPONENT. Note that the broadcast address MAV_COMP_ID_ALL may not be used in this field as it is an invalid source address.
7 to 9	uint32_t msgid:24	Message ID (low, middle, high bytes)	0 - 16777215	ID of message type in payload. Used to decode data back into message object.
For n-byte payload: n=0 - NA, n=1 - 10, n=2 - 10 to 9+n	uint8_t payload[n]:255	Payload		Message data. Depends on message type (i.e. Message ID) and contents.
(n+10) to (n+11)	uint16_t checksum	Checksum (low byte, high byte)		CRC-16/MCRF4XX for message (excluding magic byte). Includes CRC_EXTRA byte.
(n+12) to (n+25)	uint32_t signature[13]	Signature		(Optional) Signature to ensure the link is tamper-proof.

Table 2: MAVLink V2 Frame.

2) MAVLink requests and commands

Different types of messages are defined by MAVLink and are identified by their "Message ID". MAVLink version 1 is distinguishable by the length of its "Message ID" of maximum 8 bits, whereas version 2 is 24 bits. There are therefore 2 categories of messages categorised by MAVLink : Status messages : These are used to send altitude, speed, position, etc. data to the GCS or companion computer.

The command messages: They make it possible to control the behaviour of the UAV such as, for example :

- * Take-off,
- * Landing,
- * Passing through waypoints at a certain height, at a certain speed,
- * Arming or disarming the engines,
- * Setting the take-off home position,
- * Return to the take-off home position...

a) The most used commands

There are different types of commands supported, but the most commonly used are the "long" type with a "Message ID" of "76". Coded on 16 bits, the command type specifies precisely what action the UAV should perform. Next come the various useful fields, such as the target system (on 8 bits), the target component (on 8 bits) which will execute the given command. The following parameters (float) are not mandatory but depend on the command to be performed.

Target system	Target component	Command	Confirmation	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4	Param 5	Param 6	Param 7
8 bits	8 bits	16 bits	8 bits	float	float	float	float	float	float	float

Table 3 : command long structure

To illustrate a command, the takeoff command that has a Message ID equal to 22, can take as a parameter just the target altitude that the drone has to reach (param7). On the other hand, the command to arm the engines requires only 2 parameters; a boolean to arm/disarm the engines and an integer to force arm/disarm. These two parameters are set to "param1" and "param2" respectively, while "param3" to "param7" are unused. (See Table 4)

There are many different types of commands, and depending on the type, the parameters are used or not. Not all the parameters of a command are necessarily critical to its proper working.

b) The most used status

The MAVLink protocol allows for status messages to be displayed to show system information. In this section, the article will introduce some of the most important and widely used status messages.

The heartbeat message is a very important message in the MAVLink protocol and has the message id 0. It indicates that the vehicle's system (Autopilot) is connected and active. This message is generated once every second. This message is a mandatory message in the MAVLink protocol.

Type	Autopilot	Base mode	Custom mode	System status	mavlink_version
8 bits	8 bits	8 bits	32 bits	8 bits	8 bits

Table 5: Heartbeat Structure.

Table 5 shows the structure of a heartbeat message. The message has a type field which defines the type of device that is used, in our case a quadrotor (MAV_TYPE_QUADROTOR = 2). Then the frame defines the autopilot. The frame has 2 fields to define the mode, this means if the device is armed, if the joystick is connected and the active mode. There is also a status field which allows you to give information such as boot problems or an undefined system. Finally, the packet defines the version of MAVLink used.

The SYS_STATUS command provides a range of information about the battery, the communication error rate, or specific errors related to the autopilot. This command also allows to know which sensors are present and which are active. The "message ID" of this command is 1. The structure of this command is explained in Table 6.

The companion computer can obtain other data using commands such as request_data_stream or request_message. In these commands, the system requests data that will be sent to the companion computer. This data can be the position of the UAV, information from the IMU or the GPS.

Command	Command ID	Parameter	Description
Takeoff	22	1: Pitch	Minimum pitch (if airspeed sensor present), desired pitch without sensor
		2	Empty
		3	Empty
		4: Yaw	Yaw angle (if magnetometer present), ignored without magnetometer. NaN to use the current system yaw heading mode (e.g. yaw towards next waypoint, yaw to home, etc.).
		5: Latitude	Latitude
		6: Longitude	Longitude
		7: Altitude	Altitude
Command	Command ID	Parameter	Description
Arm/Disarm	400	1: Arm	0: disarm, 1: arm
		2: Force	0: arm-disarm unless prevented by safety checks (i.e. when landed), 21196: force arming/disarming (e.g. allow arming to override preflight checks and disarming in flight)
		3	Empty
		4	Empty
		5	Empty
		6	Empty
		7	Empty
Command	Command ID	Parameter	Description
Land	51	1: Abort alt	Minimum target altitude if landing is aborted (0 = undefined/use system default)
		2: Land mode	Precision land mode
		3	Empty
		4: Yaw angle	Desired yaw angle. NaN to use the current system yaw heading mode (e.g. yaw towards next waypoint, yaw to home, etc.)
		5: Latitude	Latitude
		6: Longitude	Longitude
		7: Altitude	Landing altitude (ground level in current frame)

Table 4 : MAVLink command.

Field Name	Type	Units	Values	Description
onboard_control_sensors_present	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR	Bitmap showing which onboard controllers and sensors are present. Value of 0: not present. Value of 1: present.
onboard_control_sensors_enabled	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR	Bitmap showing which onboard controllers and sensors are enabled. Value of 0: not enabled. Value of 1: enabled.
onboard_control_sensors_health	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR	Bitmap showing which onboard controllers and sensors have an error (or are operational). Value of 0: error. Value of 1: healthy.
load	uint16_t	d%		Maximum usage in percent of the mainloop time. Values: [0-1000] - should always be below 1000
voltage_battery	uint16_t	mV		Battery voltage. UINT16_MAX: Voltage not sent by autopilot
current_battery	int16_t	mA		Battery current. -1: Current not sent by autopilot
battery_remaining	int8_t	%		Battery energy remaining. -1: Battery remaining energy not sent by autopilot
drop_rate_comm	uint16_t	c%		Communication drop rate, (UART, I2C, SPI, CAN), dropped packets on all links (packets that were corrupted on reception on the MAV)
errors_comm	uint16_t			Communication errors (UART, I2C, SPI, CAN), dropped packets on all links (packets that were corrupted on reception on the MAV)
errors_count1	uint16_t			Autopilot-specific errors
errors_count2	uint16_t			Autopilot-specific errors
errors_count3	uint16_t			Autopilot-specific errors
errors_count4	uint16_t			Autopilot-specific errors
onboard_control_sensors_present_extended **	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR_EXTENDED	Bitmap showing which onboard controllers and sensors are present. Value of 0: not present. Value of 1: present.
onboard_control_sensors_enabled_extended **	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR_EXTENDED	Bitmap showing which onboard controllers and sensors are enabled. Value of 0: not enabled. Value of 1: enabled.
onboard_control_sensors_health_extended **	uint32_t		MAV_SYS_STATUS_SENSOR_EXTENDED	Bitmap showing which onboard controllers and sensors have an error (or are operational). Value of 0: error. Value of 1: healthy.

Table 5 : SYS_STATUS structure.

B. Hardware part

This part developpe the hardware of the drone in more detail. Indeed, the autopilot will be connected to a companion computer and to various elements so that the drone can fly. Therefore, it is necessary to understand these elements in order to use them in the best way.

As shown in figure 12, a typical autopilot assembly consists of a battery, a regulator with an ampmeter and a voltmeter, a card for sharing the power to the different ESCs, a horn, a safety switch, 4 ESCs, 4 motors and a radio control (RC) module.

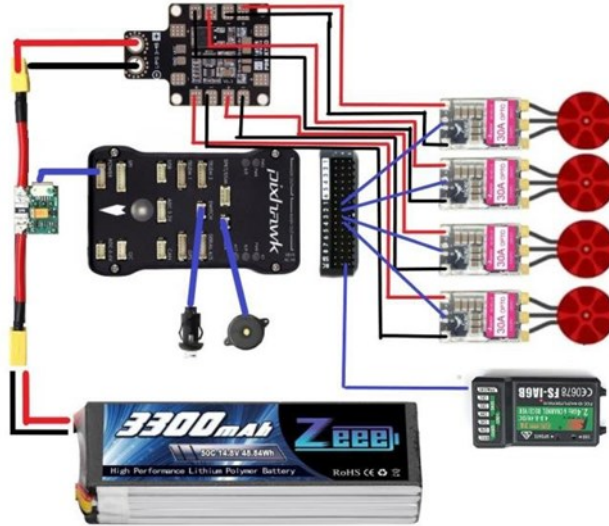


Figure 12 : Basic hardware structure of an autopilot.

Of course, other components such as GPS, various sensors or telemetry can be added to this assembly to improve the system.

1) RC Module

The RC module is present to receive manual commands from the joystick. There are several possible transfer modes for the commands. In our case, we need a PPM (Pulse position modulation) command. This modulation mode allows the combination of various PWM signals on a single input. This type of receiver is mandatory for our RadioLink. However, some have SBUS or PWM receivers. As shown in Figure 13, each PWM channel generates a pulse on the PPM channel. This mode of programming information allows different motor commands to be communicated on a single channel.

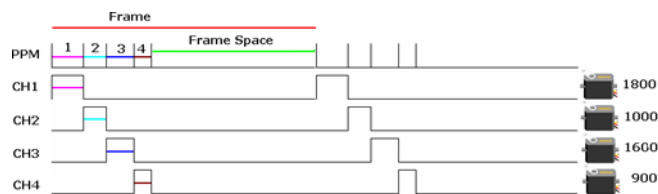


Figure 13 : PPM message.

The RC module is mandatory in our case because in the event of a failsafe, we are obliged to be able to take over. Indeed, we have kept the parameter that in case of a failsafe makes it switch to the RC command. However, the reaction of the Pixhawk to the failsafe can be set if a GPS is present.

2) Power splitter

The power splitter is used to distribute the energy from the battery to the various components of the UAV in an equitable manner. This type of device often includes a voltage regulator to supply auxiliary circuits (like a pilot for example).

3) Power module

The power module guarantees the correct distribution of the battery's energy to the various components of the drone while monitoring the output power. It is very common for the currents measured by these modules in flying drones to exceed 100A at peak !

4) ESC

The ESC is used to manage the speed of the motors. It transforms the PWM signal into a three-phase signal that generates the rotating field and makes the motor turn at the desired speed.

5) Companion computer

The companion computer is a controller on the drone that allows it to carry out a specific mission. The goal of the project is to create a drone capable of flying indoors autonomously. The purpose of a companion computer is to increase the capabilities of the autopilot and to provide it with additional interfaces such as Wi-Fi or 4G depending on the needs. Hundreds of projects exist that link the autopilot and a companion computer, whether it is a Jetson Nano for artificial intelligence or a Raspberry Pi to be able to hack the drone via Wi-Fi or to do image recognition thanks to the OpenCV library of python.

In the majority of projects seen in the literature, the link between the companion computer and the autopilot is made via the MAVLink prototype and allows the autopilot to be given commands. Therefore, in order to control our drone, we will implement a companion computer.

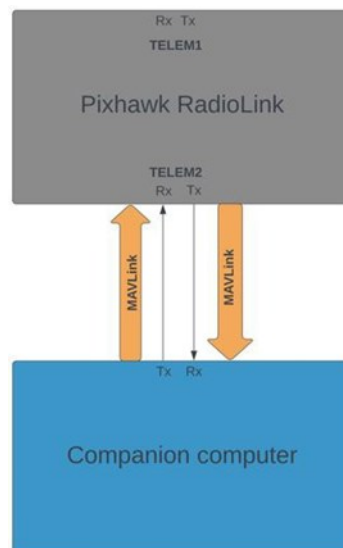


Figure 14: Mavlink set up.

For indoor flying, it is absolutely necessary to install various sensors for obstacle management and avoidance. It is therefore important to consider whether the sensors should be connected to the autopilot or to the companion computer. In fact, there are no precise rules. It depends on the case, but if the sensors are necessary for navigation, it is better to place them on the autopilot. This allows the autopilot to have access to all the information needed for the decision-making process and relieves the companion computer of this burden. However, the autopilot cannot do everything and if it requires artificial intelligence or image processing, the companion computer will have to do it. Moreover, it is interesting to connect the necessary sensors to the companion computer. Indeed, if it is the companion computer that must control and dictate the position orders to the autopilot, it must be able to access all the necessary information to perform this task. In short, it will depend on the architecture and the desired performance.

IV. TESTS PERFORMED

During the development process, several actions were executed with the "MAVLink" protocol in order to :

- Establish communication between the autopilot and the pilot (acquisition of the "Heartbeat" status),
- Acquire data from the autopilot sensors to the pilot,
- Send basic commands from the pilot to the autopilot.

Through the tests made, it emerged that a great potential for pilot control of the autopilot is conceivable. The number of available commands on MAVLink 2 is very large, as is the number of parameters that can be collected from the autopilot's sensors by the pilot. As a result, the number of features that can be implemented is accordingly large! Furthermore, the pilot can also be equipped with AI (with or without image processing if a camera is installed) This expands the possibilities of control/decision making by the pilot even more!

V. CONCLUSION

During this project, a comparison of autopilots showed that there are many different autopilots with different qualities. The article develops the logic and implementation of the communication between the autopilot and the companion computer. For this purpose, a study of the MAVLink protocol was necessary. In the future, it will be necessary to improve and finalise the communication and to define a precise mission for the UAV. In addition, it will be necessary to carry out a more in-depth study of the sensors and details of the UAVs for indoor use.

REFERENCES

- 1) Sunghun J, Hyunsu K, "Analysis of Amazon Prime Air UAV Delivery Service". Journal of Knowledge Information Technology and Systems
- 2) Pari P, "FINAL SWARM OF DRONES DEMONSTRATION", CPSwarm Consortium
- 3) Philippe C, "DRONES". Universalis.fr, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/drones/3-les-systemes-de-drones-militaires/>, accessed the 29/12/2022
- 4) Safran, "UAV &ROV Autopilot" <https://www.colibrys.com/mems-application/autopilot-uav-rov/>, accessed the 29/12/2022
- 5) McGrath, R. V., Regalado, M., Aniceto Jr, S. B., Ochengco, C. J., & Chua, A. Design of Modular Casing for Flight Controller and Companion Computer Integration for a Quadcopter UAV.
- 6) Chao, H., Cao, Y., & Chen, Y. (2010). Autopilots for small unmanned aerial vehicles: a survey. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 8(1), 36-44.
- 7) Ferial M. (2019). « Conception d'un autopilote pour un drone léger type quar-rotor », Mémoire de master, Université Saad Dahlab

Cours « Scientific literature » en Bachelier ingénieur, bloc 2



Il peut sembler étrange de demander à des étudiants de deuxième bachelier de rédiger un mini-review, alors qu'ils ne possèdent pas encore toutes les compétences techniques nécessaires. Mais faire écrire des articles scientifiques aux étudiants en début de leur formation présente plusieurs avantages :

1. **Apprentissage des compétences de recherche :** La rédaction d'articles scientifiques nécessite une recherche approfondie, ce qui permet aux étudiants de se familiariser avec les bases de la recherche dans leur domaine d'études. Même s'ils n'ont pas encore acquis toutes les compétences techniques, cela leur donne l'occasion d'explorer la littérature existante et de développer leurs capacités de recherche.
2. **Développement de compétences en communication :** Rédiger un article scientifique nécessite de bien comprendre le sujet, d'organiser les idées de manière claire et de les présenter de manière cohérente. En encourageant les étudiants à écrire des articles, on les incite à améliorer leurs compétences en communication écrite, ce qui est essentiel pour réussir dans le milieu universitaire et professionnel.
3. **Encouragement de la pensée critique :** La rédaction d'articles scientifiques demande aux étudiants d'analyser et d'évaluer de manière critique les recherches existantes. Cela les pousse à développer leur esprit critique, à évaluer la validité des informations et à formuler leurs propres idées de manière réfléchie.
4. **Motivation et engagement :** Donner aux étudiants la possibilité de contribuer à la recherche scientifique dès le début de leur formation peut les motiver et les engager davantage dans leur parcours académique. Cela leur montre que leurs idées et leurs travaux ont de la valeur, ce qui peut renforcer leur confiance en eux et leur intérêt pour leur domaine d'études.

Bien sûr, il est important de fournir aux étudiants un soutien adéquat et des ressources pour les aider dans leur processus d'écriture. Les encadrants et les enseignants peuvent jouer un rôle essentiel en guidant les étudiants et en leur fournissant des commentaires constructifs pour les aider à améliorer leurs compétences en rédaction scientifique au fil du temps.

Certes, le résultat obtenu n'est pas toujours optimum, mais il est toujours encourageant. Voici un exemple du travail fourni par les étudiants.

Mini-revue : analyses et comparaisons des différentes méthodes d'essais non destructifs par thermographie active

Zekhnini Adam, Dewitte Andréa, Dassis Rémi

Haute Ecole de la Province de Liège, Département Sciences et Techniques.

1. Résumé

Les contrôles non-destructifs sont de plus en plus utilisés dans le monde des industries. Les défauts présents dans une pièce peuvent entraîner des conséquences dramatiques, il est donc important de pouvoir les détecter de façon efficace et ce au coût le plus faible possible. Dans cette mini-revue, la méthode de thermographie active par infrarouge est explicitée. Les différentes techniques ainsi que leurs défauts et leurs avantages sont envisagés. Le matériel utilisé et la mise en place des tests étant directement lié aux matériaux testés, les différences entre matériaux métalliques et matériaux composites sont donc mis en lumière.

2. Abstract

Non-destructive testing is becoming much more important in industries nowadays. Defaults in a part can result in dramatic consequences, it is therefore important to be capable of effectively detect those defaults, at low cost. In this mini review, active infrared thermography is explained. The different techniques as well as their defaults and advantages are considered. The installation of the tests and the equipment being directly related to the tested materials, the differences between metallic materials and composite materials are brought to light in this mini review.

3. Mots-clés

Thermographie active, défauts, contrôles non-destructif et caméra infrarouge.

4. Abréviations

ULT = Ultrasound Lock-in Thermography; LT = Lock-in Thermography

5. Introduction

Ce travail a pour but de présenter l'utilisation de la thermographie infrarouge dans les essais non-destructif. Tout d'abord, cette technique est basée sur l'utilisation de radiations infrarouge afin d'analyser des données thermiques. La radiation infrarouge est en réalité l'énergie rayonnée par la surface d'un objet dont la température est supérieure au zéro absolu [1].

Premièrement, nous verrons l'utilisation de la thermographie active par infrarouge dans le contrôle non-destructif. Ensuite, nous mettrons en lumière les différentes techniques de thermographie active par infrarouge en commençant par l'excitation optique, suivie de la méthode par électromagnétisme pour finir avec l'excitation mécanique. Nous terminerons ce travail par une comparaison de ces différentes techniques ainsi qu'une conclusion.

6. Thermographie active par infrarouge pour le contrôle non-destructif

La thermographie par infrarouge est utilisée pour détecter d'éventuels défauts présents dans un matériau via une caméra thermique. On appelle cela le contrôle non-destructif par thermographie infrarouge. Contrairement à la thermographie passive, la thermographie active stimule thermiquement le matériau pour détecter la position exacte du défaut ainsi que ses dimensions [2]. Le but va être de créer un contraste thermique entre la pièce que l'on étudie et son ou ses défauts [1].

Il existe plusieurs méthodes pour stimuler thermiquement un matériau sans l'endommager tels que : excitation optique, électromagnétique et mécanique. La méthode à utiliser dépend de la nature du matériau, de son épaisseur, de sa position et de l'orientation du défaut attendu [3]. Trois éléments sont généralement utilisés dans cette technique, une caméra infrarouge, une source d'excitation ainsi qu'un algorithme qui va étudier et traiter les données [4].

7. Principe de mesure

Comme cité précédemment, une caméra thermique est généralement utilisée en thermographie. Elle mesure le rayonnement infrarouge émit en surface de la pièce stimulée thermiquement et fournit une image nommée « thermogramme ». La caméra thermique perçoit 3 rayonnements : le rayonnement émis par l'objet, le rayonnement de l'environnement et enfin, le rayonnement émis par l'atmosphère entre le corps et la caméra (négligeable). Les objets possédant une haute émissivité sont plus simples à analyser en thermographie en raison de leurs rayonnements significatifs. L'émissivité est l'aptitude d'un matériau à absorber puis à réémettre de l'énergie par rayonnement [5]. Par exemple, les composites possèdent une haute émissivité thermique, ce qui les rend plus aisés à analyser, contrairement aux métaux [3].

8. Les différentes techniques

I. Méthode par excitation optique

i. Thermographie modulée

La thermographie à modulation également connue sous le nom de « détection synchrone » est une extension de la thermographie infrarouge qui consiste à appliquer à l'objet à examiner une stimulation thermique, à savoir une modulation de chaleur d'amplitude variable en régime permanent. La présence d'une discontinuité se traduit par un déphasage entre l'évolution de la température de surface du matériau sain et celle du matériau défectueux.

Il existe plusieurs techniques pour améliorer les images thermiques obtenues afin de détecter et de caractériser les défauts. Il existe également différentes techniques de chauffage. Une de ces techniques est de moduler à plusieurs reprises une source de chaleur avec un modèle prédéterminé (comme une onde sinusoïdale) et à capter la réponse thermique résultante avec une caméra infrarouge. L'image capturée est analysée et réduite à une seule image qui regroupe toutes les informations sur les défauts internes de l'objet. Pour les grands objets tels que les bâtiments, le rayonnement solaire est une source de chaleur modulée intéressante, qui fournit des variations périodiques naturelles sur de grandes surfaces.

Plus la variation de chauffage cyclique est lente, plus la vague de chaleur générée peut pénétrer profondément dans le matériau. Ainsi, une vague de chaleur générée par le cycle jour-nuit peut pénétrer de quelques centimètres dans un mur en béton, tandis que les variations de chaleur provoquées par le changement des saisons (chaudes en été et froides en hiver) causent des vagues de chaleur qui peuvent pénétrer encore plus profondément. De ce fait, la méthode privilégiée pour étudier un bâtiment à la recherche de défauts internes près de sa surface est les variations thermiques saisonnières annuelles.

Dans le domaine de la construction, les modulations naturelles de la chaleur sont utilisées pour chauffer le bâtiment selon les cycles jour/nuit ou saisonniers pour mettre en évidence les discontinuités de la structure externe du bâtiment (exemple d'une pyramide). [6]

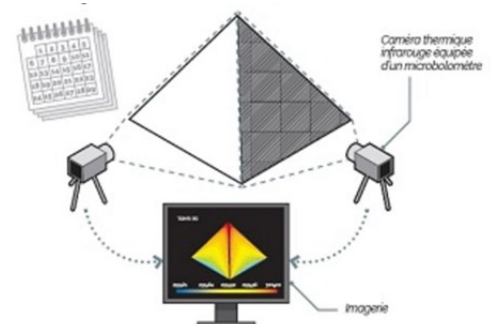


Figure 1 : Utilisation de la thermographie modulée en construction [6]

ii Thermographie pulsée

La thermographie pulsée est la technique la plus populaire en thermographie active. C'est une méthode rapide et facile à mettre en place. Elle utilise une stimulation optique (impulsion thermique) pour perturber l'équilibre thermique de la pièce. La taille et la diffusivité de la pièce à inspecter influence la durée de la stimulation (la stimulation peut aller de quelques microsecondes à plusieurs secondes). La réponse thermique de l'objet est enregistrée avec une caméra infrarouge et est ensuite analysée numériquement avec le contraste thermique (comparaison entre image sans défaut et celle enregistrée).

En pratique, la thermographie pulsée consiste à chauffer un échantillon pendant un temps assez court et à enregistrer l'évolution de la température sur la surface de l'échantillon. Un défaut sur l'échantillon est détecté par l'apparition d'une anomalie sur le champ thermique.

Il existe deux modes de configurations pour les tests en thermographie pulsée. Le mode transmission et le mode réflexion. En mode transmission, la source de chaleur se trouve à l'opposé de la surface d'inspection. En mode réflexion, la source de stimulation se trouve du même côté de la pièce à analyser.

Le test en réflexion sera privilégié pour la détection de défaut en surface tandis que le mode transmission sera mieux adapté pour la détection de défauts proches de la surface opposée à la caméra. Le mode transmission permet donc la détection de défauts plus profonds. Ce mode nécessite l'accès aux deux côtés de la pièce à inspecter et ne nous informe pas sur la profondeur du défaut. [7]

II. Méthode par électromagnétisme

i. Excitation par induction

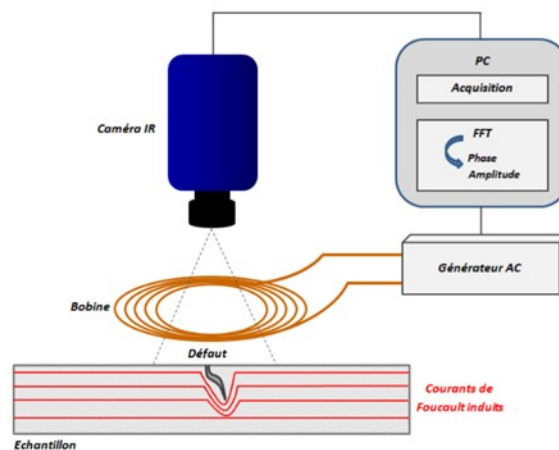


Figure 2 : schéma de principe : thermographie active par induction [8]

Cette méthode consiste à faire passer un courant alternatif dans une bobine placée près de la pièce sur laquelle on souhaite détecter la présence d'un éventuel défaut. La bobine, qui est traversée par le courant crée des courants induits dans la pièce, appelés courants de Foucault. Par effet de joule, ces courants produisent un échauffement de la pièce. La présence d'un défaut crée une perturbation dans la propagation des courants induits qui résulte d'une surchauffe autour de celui-ci. L'inhomogénéité du champ de distribution des courants de Foucault se propage jusqu'à la surface de la pièce et peut être détectée par une caméra thermique [8].

La profondeur des courants de Foucault dépend de plusieurs facteurs ; de la fréquence de ces courants, de la perméabilité magnétique et de la conductivité électrique du matériau. Donc, pour chaque pièce à contrôler, une bobine inductrice est conçue en fonction de la géométrie de la pièce, des défauts recherchés et des propriétés du matériau.

III. Méthode par excitation mécanique

i. Vibro-thermographie pulsée

Le principe de la vibro-thermographie pulsée est d'utiliser un transducteur pour envoyer des vibrations de signal sinusoïdal dans l'objet (10-100 Hz). Cette stimulation mécanique, en présence d'un défaut, génère de l'énergie thermique sous l'effet de la friction entre les faces du défaut, de la dissipation par hystérésis viscoélastique dans la zone autour de celui-ci, ou encore par déformation plastique [3]. Cet échauffement se propage jusqu'à la surface du matériau par diffusion et devient détectable par la caméra thermique.

Pour réaliser cette méthode, il faut que les deux côtés du défaut soient libres de vibrer. Généralement, une bulle d'air ne peut pas être détectable, contrairement à fissure perpendiculaire à la surface d'inspection qui quant à elle, peut être détectée grâce à la vibro-thermographie. Ce genre de fissure est souvent source de problèmes dans le contrôle non-destructif.

ii. Vibro-thermographie modulée

Comme en thermographie modulée, on va moduler la fréquence qui va effectuer la stimulation vibratoire par un signal de très basse fréquence d'une fraction de Hertz. Pour cette technique, il est nécessaire de déclencher la caméra en même temps que le démarrage de l'excitation vibratoire afin de pouvoir enregistrer une suite d'images correspondant à un nombre de cycles de modulation. Il sera dès lors possible de trouver la phase et l'amplitude d'un signal modulé si on prend suffisamment de clichés avec un écart égaux entre chaque cliché [9].

La principale différence entre la thermographie modulée et la vibro-thermographie modulée est que le défaut va lui-même générer une onde thermique. En effet, celle-ci va directement émaner du défaut (de la discontinuité) sans faire un aller-retour à partir de la surface d'inspection. Cela va permettre de ne pas avoir une perte d'énergie par réflexion et dès lors va rendre cette méthode plus apte à la détection de défauts en profondeur [9].

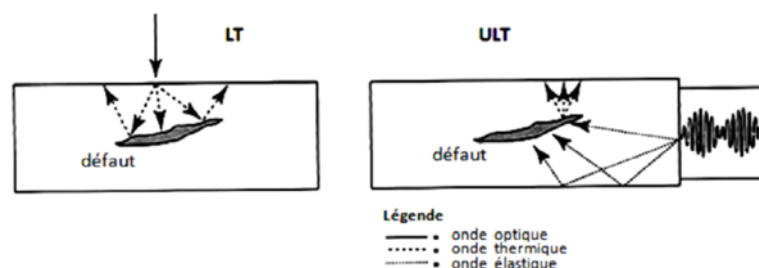


Figure 3 : Trajets des ondes thermiques dans la thermographie modulée (LT) et la vibro-thermographie modulée (ULT) [9]

De plus, l'avantage de cette technique est que l'on va pouvoir voir la profondeur d'un défaut contrairement à la vibro-thermographie pulsée. Cependant la vibro-thermographie modulée nécessite plus de temps que la vibro-thermographie pulsée.

L'installation classique d'un test en vibro-thermographie modulée (voir figure 4) est la même qu'en vibro-thermographie pulsée à l'exception qu'il est nécessaire d'avoir une unité de commande capable de générer un signal modulé en amplitude ou en fréquence. Ici, nous nous intéressons seulement à un signal modulé en fréquence.

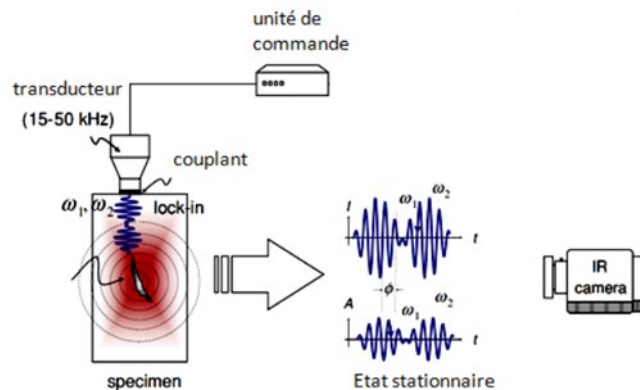


Figure 4 : installation classique d'un test en vibro-thermographie modulée [9]

Cette technique nécessite cependant un contact pour transmettre le signal vibratoire et malheureusement, celui-ci peut se comporter comme une source de chaleur interne. Cela va créer un manque de reproductibilité des résultats et sera donc dans la majorité des cas utilisée en laboratoire.

9. Comparaison

Les différentes techniques illustrées plus haut seront plus ou moins performantes en fonction des matériaux utilisées. Dans le cas des matériaux composites, les techniques de thermographie active dans le domaine du contrôle non-destructif, permettent d'obtenir d'excellent résultats pour un faible coût [9]. En effet, pour les matériaux composites, la chaleur va s'accumuler et rester localiser autour du défaut. Cette chaleur sera détectable par une caméra infrarouge. Parmi les différentes thermographie active, c'est la thermographie pulsée qui sera la mieux adaptée pour les matériaux composites.

Dans le cas de la thermographie pulsée, la durée du pulse thermique va varier de quelques millisecondes si on utilise des métaux ou des matériaux à haute conductivité thermique contre quelques secondes pour les matériaux composites tel que l'époxy par exemple. Ceci étant dû à la cinétique thermique des matériaux [9]. La durée d'un test en vibro-thermographie pulsée va également dépendre de la cinétique thermique du matériau. On parlera de quelques secondes pour les composites et autres matériaux disposant d'une cinétique thermique lente contre quelques millisecondes pour les matériaux métalliques disposant d'une cinétique thermique beaucoup plus rapide [9]. De plus, cette technique sera inapplicable pour certains matériaux composites comme les structures en nid d'abeille, pour certains défauts comme les fissures ou délaminages fermés mais également en présence de porosité [9].

La stimulation optique quant à elle est plus adaptée pour les matériaux à cinétique thermique lente car ceux-ci maintiennent le surplus de chaleur aux alentours du défaut [9]. En réalité, seule la thermographie optique est agréée pour l'inspection de matériaux composites.

La thermographie modulée permet d'inspecter de grandes surfaces mais elle est limitée pour ce qui est de l'inspection de défauts plus profonds même avec une bonne source d'excitation. [2] [10]

Concernant la thermographie par induction, cette dernière est plus adaptée lorsqu'il s'agit de matériaux conducteurs comme les métaux par exemple. En effet, avec une bonne conductivité électrique, les courants de Foucault pénètrent plus facilement et permettent plus d'échauffements par effet de joule.

10. Conclusion

Cette mini-revue permet d'en apprendre plus sur les méthodes de thermographie active. L'existence de défauts est courante, d'où l'utilité de la thermographie. On remarque que les trois méthodes consistent à chauffer le matériau et d'ensuite de déterminer les dimensions du défaut au moyen d'une caméra thermique. La seule différence est le procédé pour exciter le matériau. On constate que certains matériaux, en fonction de la méthode utilisée, présentent des propriétés qui les rendent plus simple à analyser. On constate aussi qu'il n'existe pas une méthode plus performante que les autres. En effet, en fonction de la nature du matériau, de sa position et de l'orientation du défaut attendu, une méthode sera favorisée.

11. Remerciements

Nous voudrions tout d'abord remercier notre professeur Monsieur Philippe Demy pour les informations sur la thermographie active par infrarouge apportées durant le cours.

Nous voudrions également remercier Monsieur Arnaud Cawez pour la présentation de son travail de chercheur, de la machine et des différents outils dont il se sert ainsi que ses explications sur les techniques de thermographie active par infrarouge.

12. Références

- [1] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, 14(7), Art. 7. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
- [2] *cofrend—THERMOGRAPHIE (TT)*. (s. d.). Consulté 29 novembre 2022, à l'adresse https://www.cofrend.com/jcms/uat_128233/fr/thermographie-tt
- [3] Montrieux, H.-M., Demy, P., Ibarra-Castanedo, C., Mertens, A., Gerlach, N., Lecomte-Beckers, J., & Maldague, X. (s. d.). Comparison between optical pulsed thermography and vibrothermography for the assessment of carbon fiber composite materials. *Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials*.
- [4] *Essai non destructif*. (s. d.). Consulté 29 novembre 2022, à l'adresse <https://boowiki.info/art/ingenierie/essai-non-destructif.html>
- [5] *Thermographie*. (s. d.). Techniques de l'Ingénieur. Consulté 5 décembre 2022, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-mesures-physiques-tiarc/archive-1/thermographie-r2740/>
- [6] *ScanPyramids : La thermographie modulée*. (s. d.). Consulté 19 décembre 2022, à l'adresse <https://www.usinenouvelle.com/article/scanpyramids-la-thermographie-modulee.N1842717>
- [7] Larbi, B. (s. d.). *Comparaison expérimentale de la thermographie modulée et de la thermographie pulsée pour l'évaluation non destructive des matériaux employés en aérospatial*.
- [8] Bouteille, P. (s. d.). *Thermographie par induction : Une alternative aux contrôles conventionnels sur pièces forgées*.
- [9] *Résonance locale et caractérisation de défauts de délaminage par vibrothermographie*. (s. d.). Consulté 10 décembre 2022, à l'adresse <https://core.ac.uk/display/43184060?source=4>
- [10] Zhang, H., Sfarra, S., Sarasini, F., Ibarra-Castanedo, C., Perilli, S., Fernandes, H., Duan, Y., Peeters, J., Avdelidis, N. P., & Maldague, X. (2018). Optical and Mechanical Excitation Thermography for Impact Response in Basalt-Carbon Hybrid Fiber-Reinforced Composite Laminates. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(2), 514522. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2744179>