

Décodage d'informations transmises par lumière à l'aide d'une caméra

Clémence Picquet*

Marie Adler*

Vincent Bombardier†

Florent Lefevre†

Fabián Seguel†

* Étudiante à TELECOM Nancy, Villers-les-nancy, France

†Université de Lorraine, CRAN CNRS UMR 7039, F-54506 Vandoeuvre-les-nancy

Résumé—Cet article est une preuve de concept concernant la recherche menée pour décoder des informations transmises grâce à un signal lumineux provenant d'une LED. Contrairement aux techniques développées jusqu'alors, la détection de l'information ne se fait pas à l'aide d'un capteur focalisé sur la LED mais grâce à une caméra qui filme à la fois la LED et l'environnement de celle-ci. Compte tenu des techniques de transmission utilisées, plusieurs méthodes de décodage d'information sont analysées en prenant en compte les incertitudes qu'elles induisent et des manières d'y pallier. L'étude en est à ses débuts, par conséquent les paramètres et les méthodes de transmission de l'information ne sont pas encore fixées définitivement. Les techniques de décodage développées ont donc dû s'adapter de manière flexible aux changements appliqués. Grâce aux résultats obtenus, les méthodes de transmissions ont pu être améliorées suite à une meilleure compréhension du phénomène.

Index Terms—Optical camera communication (OCC), décodage de signal lumineux, échantillonnage, modulation de fréquence, analyse d'image, luminosité, en-tête, LED

I. INTRODUCTION

Dès 1880, Alexander Graham Bell invente le photophone, un téléphone optique, qui utilise la lumière pour transmettre des informations. Malheureusement, ne pouvant transmettre les informations par temps non dégagé, le photophone ne connut pas le succès attendu. Mais ce dernier est considéré comme étant le précurseur de Li-Fi.

Li-Fi, apparu dans les années 1990, est un protocole qui permet de transmettre des informations grâce à la lumière suivant les standards définis dans l'article [1]. Longtemps mis en arrière par rapport au Wi-Fi, il prend de plus en plus d'importance en raison de la saturation des réseaux.

Sans le protocole Li-Fi, il est toujours possible de transmettre des informations grâce à la lumière comme dans le secteur de l'aviation ou dans le secteur maritime

en utilisant une lampe et le code morse.

L'entreprise CitizenCam a choisi d'exploiter cette technologie afin de proposer un système de sélection automatique de locuteur lors de réunions ou rassemblements dans lesquels plusieurs sujets seraient amenés à prendre la parole, voir figure 1.

Chaque locuteur potentiel possède un micro sur lequel se trouve une LED, voir le cadre rouge sur la figure 1. Lorsque le locuteur prend la parole, la LED envoie un signal lumineux permettant de détecter la prise de parole ainsi que l'identité du locuteur.

Ce dispositif permet notamment de faciliter le montage vidéo si plusieurs caméras filment la scène car celle filmant le locuteur sera automatiquement sélectionnée.

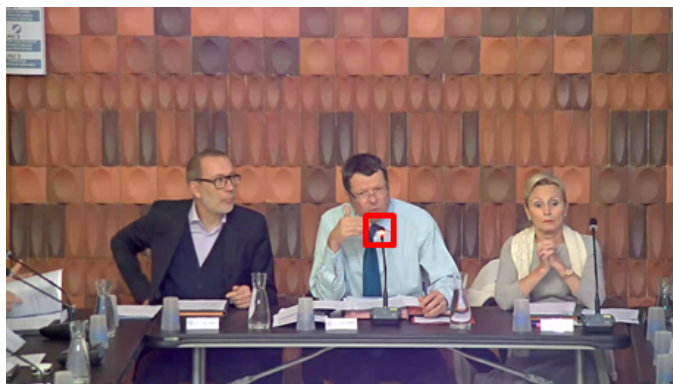


FIGURE 1: Exemple d'utilisation de la technologie

Afin de pouvoir mettre en place ce dispositif, des recherches sont en cours au laboratoire du CRAN. Comme le décrit l'article [2], elles visent à trouver la manière d'échantillonner et de transmettre le signal lumineux via la LED en introduisant le moins d'erreurs possible dans le message émis.

Dans le cadre de ces recherches, il convient de mettre au point un moyen de décoder le signal émis par une LED. Ce problème soulève plusieurs questions : Comment

localiser le message dans le signal lumineux? Comment pallier les erreurs de transmission et garantir l'exactitude du message déchiffré? Quelle est l'influence des facteurs extérieurs (distance, luminosité ambiante, position dans l'image) sur la détection du signal?

Afin de répondre à ces questions, des messages émis grâce à différentes techniques ont été décryptés. Les résultats ont été analysés et les méthodes de décodage ont évolué de manière à réduire au minimum le nombre d'erreurs dans le message obtenu.

La partie *état de l'art* rappellera des techniques qui utilisent la transmission d'information par une source lumineuse, puis dans la partie *méthodologie* explique le moyen de coder et de décoder les vidéos. La partie *résultats* quant à elle détaillera des résultats obtenus au long de la recherche. Enfin, la partie *conclusion* traitera des résultats obtenus et la possibilité que l'étude ouvre.

II. ÉTAT DE L'ART

Afin de pouvoir décoder de l'information provenant d'une source lumineuse, il faut trouver comment moduler le signal émis, en accord avec le moyen de détection utilisé. Cette partie a pour but de faire l'étude de l'existant de ces techniques. Ces recherches s'appuient sur des articles [3], [4], [5], [6] publiés à ce sujet.

A. Modulation sur écran

Cette technique consiste à coder l'information sur des plans en deux dimensions présents sur l'image capturée par la caméra. Les informations codées peuvent être visibles ou non par l'être humain. Les QR codes sont des exemples visibles de ce type de communication (figure 2). En ce qui concerne le non-visible, les informations sont le plus souvent dispersées dans l'image et parfois dans le temps. Cette méthode de modulation est utilisée le plus souvent sur des distances assez courtes qui dépassent rarement le mètre.



source : Wikipedia

FIGURE 2: Exemple de QR Code

B. Modulation sur-échantillonnée

Dans ce principe, les données sont reçues en sur-échantillonnant le signal lumineux. On peut noter deux méthodologies. La première consiste à moduler la polarisation du signal lumineux, la caméra traduisant ces changements par des variations d'intensité lumineuse. La deuxième exploite le fonctionnement des "rolling shutter"

des caméras procédant à l'acquisition d'une image ligne par ligne. Si l'intensité du signal varie lors de l'acquisition, on obtient une image contenant des bandes de luminosité différentes que l'on peut exploiter pour déchiffrer le message, voir figure 3.

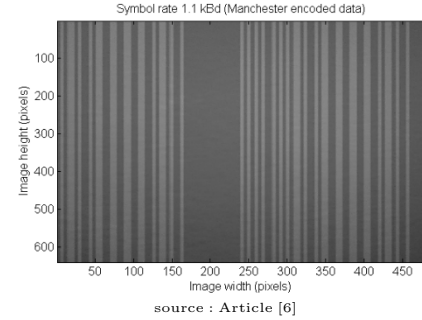


FIGURE 3: Capture d'un message à l'aide d'une "Rolling Shutter Camera"

C. Modulation sous-échantillonnée

Afin d'être invisible à l'œil nu, la fréquence de variation de la source lumineuse doit être suffisamment élevée. Cependant, la fréquence d'acquisition de la plupart des caméras est de $30fps$, ce qui est trop bas. Pour pallier ce problème, la solution utilisée est la modulation sous-échantillonnée : La fréquence du signal envoyé est supérieure à celle d'acquisition de la caméra. Par la suite, nous allons voir deux méthodes de modulation du signal lumineux permettant d'encrypter un signal binaire.

Modulation de la fréquence : Chaque bit d'information est codé par une fréquence différente. Soit F_c la fréquence d'acquisition de la caméra. On codera un 1 à une fréquence $F_1 = k * F_c$ et un 0 à une fréquence $F_0 = k * F_c - F_c/2$. Ici k est un entier positif suffisamment grand pour éviter que le clignotement de la source lumineuse ne soit visible à l'œil nu.

Par exemple en prenant $F_c = 30$ et $k = 4$, on peut poser $F_1 = 120$ et $F_0 = 105$.

Ainsi, comme expliqué sur la figure 4 deux acquisitions permettent de décoder un 1 si on obtient deux images identiques (sombres ou lumineuses) et un 0 si on obtient deux images de luminosités opposées.

Modulation de la phase : Un signal modulé selon la phase se décode de la même manière qu'avec une modulation de la fréquence comme expliqué sur la figure 5.

III. MÉTHODOLOGIE

A. Matériel

Les vidéos expérimentales sont prises par une caméra Axis, qui est une caméra CMOS à 30fps (30 images par seconde). Les LED utilisées font 5mm par 5mm et elles ne peuvent être que dans deux états différents, soit allumée soit éteinte.

Afin de traiter et d'analyser les vidéos, un logiciel (fig. 6), codé en *Python* a été implémenté. Ce logiciel utilise la bibliothèque *OpenCV* pour le traitement d'image et *matplotlib* pour afficher des graphiques.

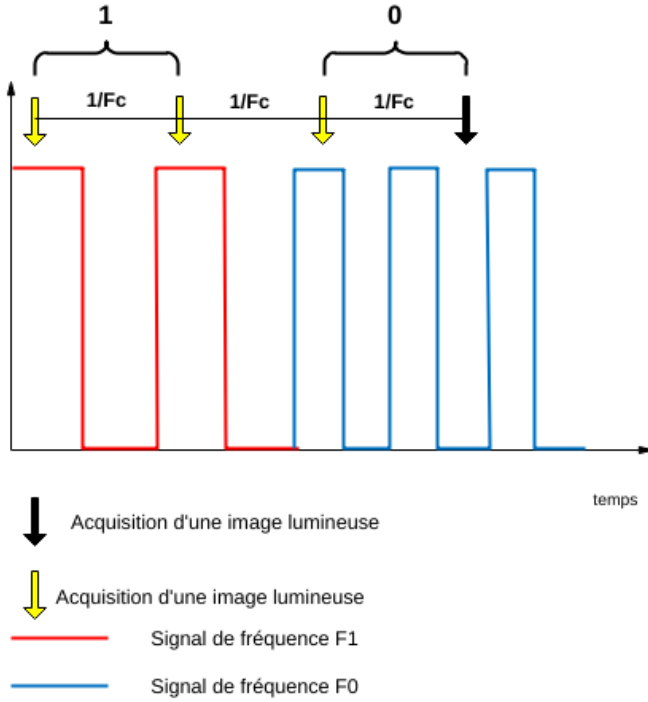


FIGURE 4: Modulation de la fréquence

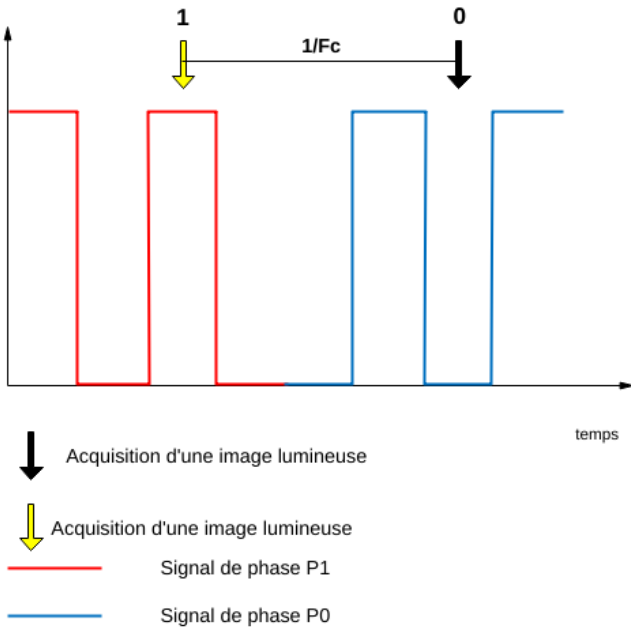


FIGURE 5: Modulation de la phase

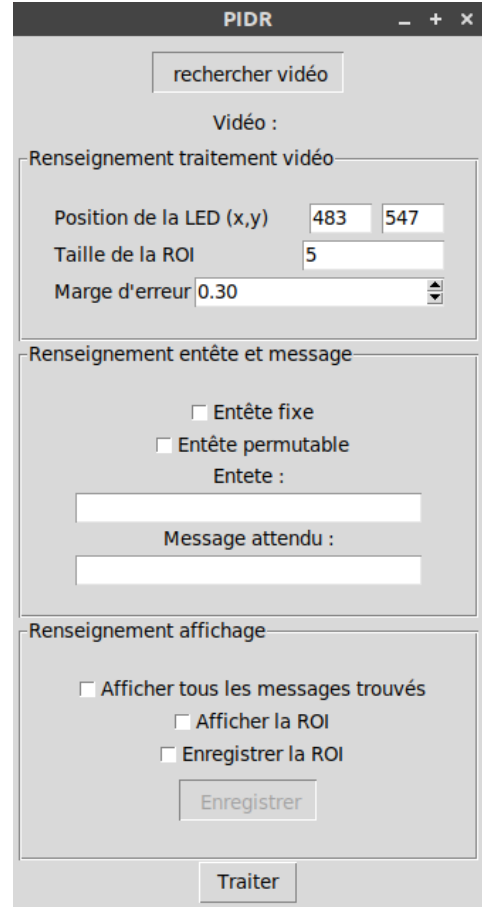


FIGURE 6: Aperçu du logiciel d'analyse des vidéos développé

B. Structure du signal

Les vidéos filmées contiennent plusieurs fois le même message. Un message est composé d'une en-tête et du corps contenant l'information. L'en-tête permet la localisation du message dans la suite de bits décryptés. Sa composition varie selon les techniques employées. Il faut noter que le début de l'acquisition du signal ne correspond pas forcément au début d'un message.

L'en-tête est une série de bits prédéfinie, qui ne change pas au cours du temps, et qui se trouve immédiatement

avant chaque corps de message.

Une fois l'en-tête retrouvé et connaissant la taille du message, ce dernier est récupéré. Le problème de cette méthode est que la suite de bits composant l'en-tête peut faire également partie de la composition du message lui-même. Ainsi pour être certain de décoder tous les messages, tous les en-têtes possibles sont considérés, au risque de décoder des messages qui n'en sont pas un, voir figure 7.

Longueur du message = 8
Entête = 01

01110111000111011100011101110001
11011100 11011100 11011100
11000111 11000111 11000111

Messages trouvés

FIGURE 7: Messages détectés avec un en-tête fixe

Pour pallier le problème de la localisation des en-têtes, une seconde solution est utilisée : construire un en-tête qui permute un message sur deux. C'est-à-dire que pour deux en-têtes qui se suivent, les 1 et les 0 s'inversent (les 1 deviendront des 0 et les 0 des 1), voir figure 8.

En-tête 1	En-tête 2
00110	11001

FIGURE 8: Exemple de deux en-têtes permutable à la suite

Ce protocole permet de s'assurer que l'en-tête n'est pas un corps de message en comparant l'en-tête avec les bits situés une longueur de message plus loin. Si ces bits forment l'en-tête inversé, le message est effectivement compris entre ces deux en-têtes. Si au contraire, ces bits ne sont pas une permutation de l'en-tête présumé, c'est que ce dernier n'était pas un en-tête mais une partie du message, voir figure 9.

Longueur du message = 4
Entête = 01/10

01000010000001000010 Bonne entête
01000010000001000010 Mauvaise entête

FIGURE 9: Messages détectés avec un en-tête permutable

C. Protocole d'analyse

Les vidéos traitées contiennent un enregistrement d'une LED positionnée à un endroit fixe. Les coordonnées de cet endroit sur l'image sont connues. Dans un premier temps

la vidéo est découpée image par image puis les images sont rognées pour ne conserver que la région d'intérêt (ROI). Cette sélection est un carré ayant pour centre les coordonnées de la LED et pour côté le nombre de pixels spécifié dans le champ *Taille de la LED* du logiciel (fig. 6)

Par la suite, chaque image est traitée pour obtenir la luminosité moyenne de la ROI grâce aux fonctions d'OpenCV. Cette luminosité permet de savoir si la LED est allumée ou éteinte. En effet, si la luminosité est haute alors la LED est allumée tandis que si elle est basse, la LED est éteinte.

Afin de déterminer précisément l'état d'une LED, il est nécessaire de définir un seuil de luminosité au-dessus duquel la LED est considérée comme allumée. Ce seuil est déterminé automatiquement par le logiciel en prenant la moyenne des luminosités minimale et maximale sur les 100 premières images. Une deuxième technique développée consiste à mettre en place deux seuils : un seuil haut Sh et un seuil bas Sb . Si la luminosité moyenne est supérieure à Sh , la LED est considérée comme allumée, si elle est inférieure à Sb la LED est considérée comme éteinte et si elle est comprise entre Sb et Sh elle est indéterminée.

Ainsi en définissant ainsi un seuil de luminosité, on obtient après traitement de toutes les images un tableau d'états (allumé, éteint ou indéterminé) de la LED, voir figure 10.

Luminance par rapport au seuil d'erreur	État
Luminance dans le seuil d'erreur	3
Luminance au-dessus du seuil d'erreur	1
Luminance en-dessous du seuil d'erreur	0

FIGURE 10: Codage d'un bit selon deux états

Il reste à traduire cette succession d'états en suite de bits d'information. Comme expliqué dans le paragraphe II-C il faut comparer les états deux à deux pour en déduire le bit codé suivant la figure 11.

État 1	État 2	Bit
LED éteinte	LED éteinte	1
LED éteinte	LED allumée	0
LED allumée	LED éteinte	0
LED allumée	LED allumée	1
indéterminée	LED allumée/éteinte	3
LED allumée/éteinte	indéterminée	3
indéterminée	indéterminée	3

FIGURE 11: Codage d'un bit selon deux états

Grâce à cette méthode de décodage, on peut localiser l'en-tête parmi la suite d'état. Pour ce faire, on parcourt la suite d'état en décodant une portion correspondant à la longueur de l'en-tête. Si le message décodé s'avère être un en-tête, alors le message le suivant immédiatement est décodé. Il est important de suivre ce protocole car si on commence par décoder l'intégralité des états en une suite de bit pour ensuite y chercher l'en-tête, on ne peut pas être sûr d'avoir fait la bonne association d'états lors du décodage.

En effet, si l'acquisition de la vidéo ne commence pas avec le début d'un message, il est possible qu'elle débute durant la transmission d'un message à partir d'un état i , voir figure 12. Or cet état i est le deuxième état codant un bit. L'analyse de la vidéo serait alors "décalée" et le message transmis serait différent, voir figure 13.

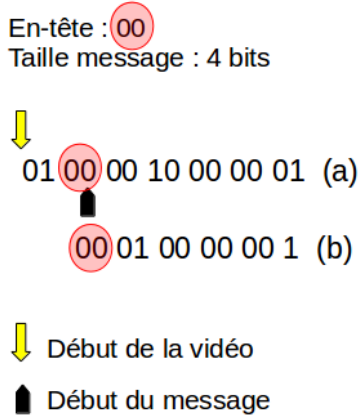


FIGURE 12: Mise en évidence d'un décalage dans la lecture d'état durant l'analyse d'une vidéo

Message (a) : 1 0 1 1
Message (b) : 1 0 0 0

FIGURE 13: Mise en évidence d'un décalage dans la lecture d'état durant l'analyse d'une vidéo

Les messages ainsi obtenus peuvent contenir des erreurs empêchant la bonne détermination du message. Pour pallier ce problème, il faut exploiter la répétition du message dans les vidéos. La méthode mise en place consiste en la définition d'un unique message final corrigé de la manière suivante :

chaque bit b_i du message corrigé est défini par l'état prépondérant du bit b_i des messages décodés. Il faut noter que les bits indéterminés n'entrent pas en compte dans l'évaluation de b_i . S'il y a autant de bit à 1 que de bit à 0 pour b_i , on pose arbitrairement $b_i = 1$.

IV. RÉSULTATS

Les méthodes décrites précédemment ont permis de mieux comprendre et évaluer la détection des messages lumineux. Lors de l'étude, la recherche concernant le codage et l'envoi de l'information n'avait pas encore abouti. Par conséquent, les travaux décrits dans ce document ont contribué à identifier les erreurs de transmission des messages et à proposer des pistes d'amélioration.

A. Identifier la taille idéale de la ROI

La taille de la ROI influe grandement sur la luminosité obtenue lors du décodage des vidéos. En effet si la ROI est trop grande, un changement d'état de la LED aura peu d'influence sur la luminosité obtenue.

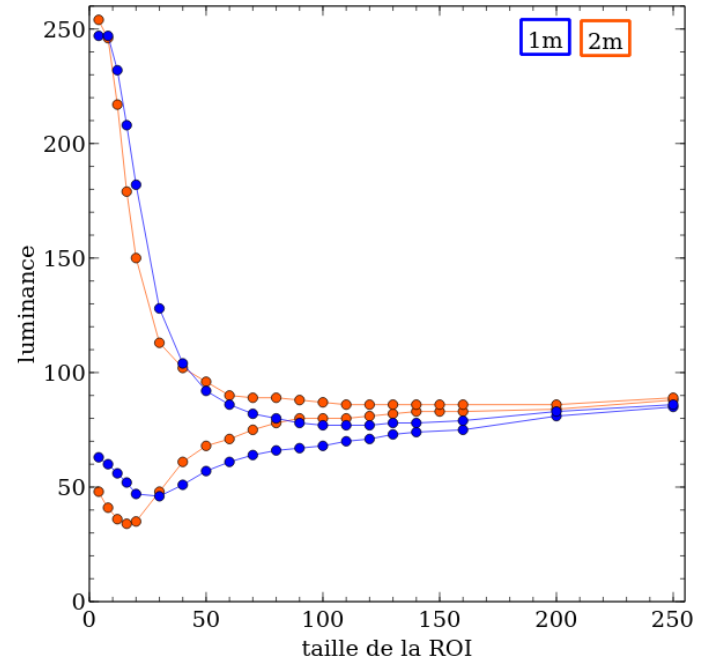


FIGURE 14: Évolution de la luminosité en fonction de la taille de la ROI

Les deux courbes en bleu et en orange sur la figure 14 représentent la luminosité en niveaux de gris pour des LED filmées à une distance de 1m et 2m. La taille de la ROI est la taille d'un côté du carré en pixels.

Le signal envoyé étant celui d'un 0, on a donc une alternance d'états éteints et allumés ce qui explique le doublement des courbes.

On remarque que, quelle que soit la distance entre la LED et la caméra, à partir d'une certaine taille de ROI, la luminosité se stabilise autour de ce qui semble être la luminosité moyenne de l'environnement.

De plus, on observe qu'en augmentant la taille de la ROI, l'accroissement de la courbe s'inverse aux alentours de 20 pixels. Ce point d'inflexion peut s'interpréter par le

passage du fond noir placé derrière la LED au reste de la pièce plus lumineux : quand la ROI dépasse la taille du carré vert représenté sur la figure 15, l'arrière-plan cesse de diminuer la luminance moyenne. Celle-ci converge alors vers la luminosité moyenne de l'environnement.

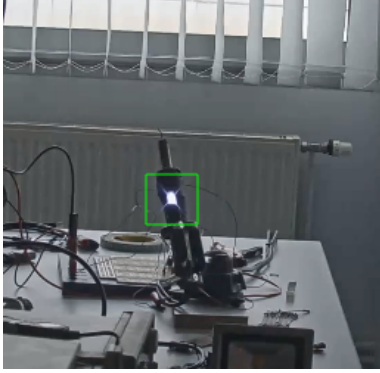


FIGURE 15: Plan extrait d'une vidéo

D'après cette analyse, on peut conclure que la ROI doit être suffisamment petite pour ne contenir que la LED. Ainsi la couleur de l'environnement et la luminosité ambiante n'auront que très peu d'effet sur la luminosité de la ROI.

Suite à ces conclusions, des vidéos ont été étudiées en fixant la taille de la ROI de sorte qu'elle ne couvre que le centre de la LED. Ces expériences nous ont permis de définir une limite inférieure concernant la taille de la ROI. En effet, lorsque la transmission d'information est désynchronisée par rapport à la fréquence d'acquisition de la caméra, la LED peut apparaître dans deux états à la fois comme sur la figure 16 (cela signifie que le changement d'état a eu lieu pendant l'acquisition de l'image). Lorsque ce phénomène est détecté, l'état est analysé comme étant indéterminé afin de ne pas fausser la déduction du message corrigé. Cependant, en utilisant une ROI trop petite, il est possible qu'un phénomène tel que celui de droite sur la figure 16 ne soit pas détecté et entraîne ainsi des erreurs dans la correction des messages.

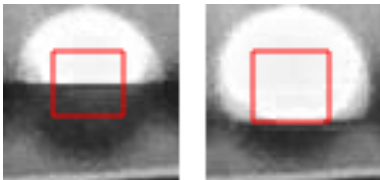


FIGURE 16: ROI sur des images de LED désynchronisées par rapport à la caméra

La taille idéale de la ROI pour détecter des messages est donc celle de la LED. Cela permet de prendre en compte les erreurs liées à la désynchronisation et d'ignorer la luminosité de l'environnement.

B. Localiser le message grâce à un en-tête adapté

Parmi les données décodées, l'en-tête est un élément essentiel puisque c'est lui qui permet de localiser le message. Un bon en-tête est une suite de bits ou d'états qui ne peuvent pas être confondus avec le corps du message. Au cours de cette étude, plusieurs en-têtes ont été testés.

Identification par la luminosité : La première détection d'en-tête mise au point est basée sur la luminosité de la ROI analysée. Contrairement à l'information qui est codée grâce à des fréquences de $120Hz$ et $105Hz$, l'en-tête est codé par un signal de fréquence beaucoup plus élevée. La raison de ce changement de fréquence est de pouvoir détecter une luminosité intermédiaire dans la ROI, entre celles des états allumés et éteints. Cette luminosité intermédiaire serait due à l'acquisition de plusieurs états différents dans une même image (on obtient ainsi le même résultat que pour un message désynchronisé figure 16).

Cependant, suite aux résultats expérimentaux, il s'est avéré que cette configuration n'était pas réaliste et que la luminosité supposée intermédiaire était trop proche de celle de l'état allumé. Pour une ROI de 15 pixels d'une LED filmée à $1m$, la moyenne des niveaux de gris pour l'en-tête est de 237 alors qu'elle est de 236 pour la fréquence de $120Hz$.

Identification par une suite de bits : Une seconde manière de coder l'en-tête est de lui associer une suite de bits spécifique que l'on exclura de tout message afin d'éviter les confusions. L'avantage de cette technique est la facilité de détection de la séquence spécifique. Cependant, plus on réduit la taille de l'en-tête en laissant de la place pour le corps du message, plus le nombre de messages contenant l'en-tête est important. Le nombre de messages possibles est donc réduit d'autant.

Identification par permutation d'une suite de bits : Une dernière méthode de construction d'en-tête a été mise au point. À l'instar de la méthode précédente, celle-ci consiste à associer à l'en-tête une suite de bits spécifique. Ce qui change dans cette méthode expliquée dans le paragraphe III-B, c'est la permutation des bits de l'en-tête à chaque message.

C. Comprendre l'origine des erreurs dans le message

Les vidéos analysées lors de l'étude n'étant pour la plupart pas encore exploitables, les méthodes et le logiciel développé permettent surtout de déceler et comprendre les erreurs de transmission et de codage commises lors de l'émission du message.

Affichage de la luminosité : Une fois les options d'analyses renseignées dans le logiciel, celui-ci commence par analyser la luminosité moyenne de la ROI au cours

des images et affiche à l'écran le graphique correspondant.

Un premier problème concernant la luminosité ambiante a été détecté grâce au logiciel. Les vidéos ayant été filmées dans une salle éclairée au néon, une variation de luminosité est venue s'ajouter à celle provoquée par la LED. Sur la figure 17 on observe ce bruit grâce aux points répartis aléatoirement.

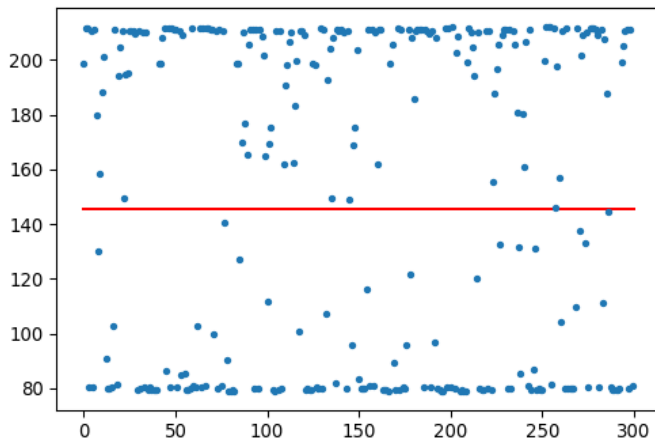


FIGURE 17: Mise en évidence du bruit dans la luminance moyenne de la ROI

Un deuxième problème mis en évidence est la désynchronisation de l'échantillonnage des signaux transmis par rapport à la fréquence d'acquisition de la caméra. Cette erreur visible sur le graphique 18 est très gênante puisqu'elle induit un décalage dans la détection des bits et il en résulte des erreurs cycliques dans les messages détectés.

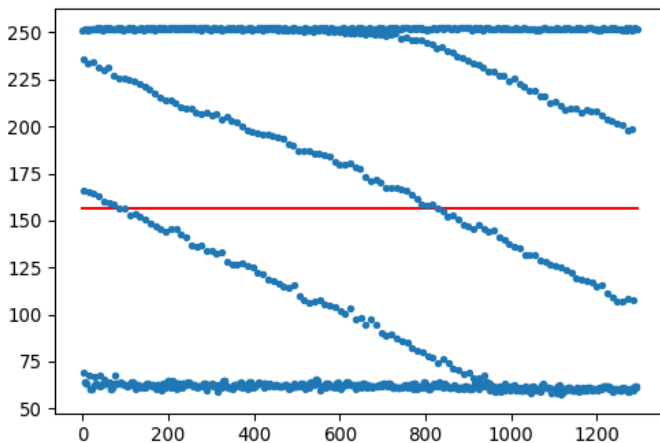


FIGURE 18: Mise en évidence de la désynchronisation du signal lumineux par rapport à la caméra

En augmentant la fréquence d'échantillonnage au dessus de $50kHz$, ce phénomène disparaît comme le montre la

figure 19

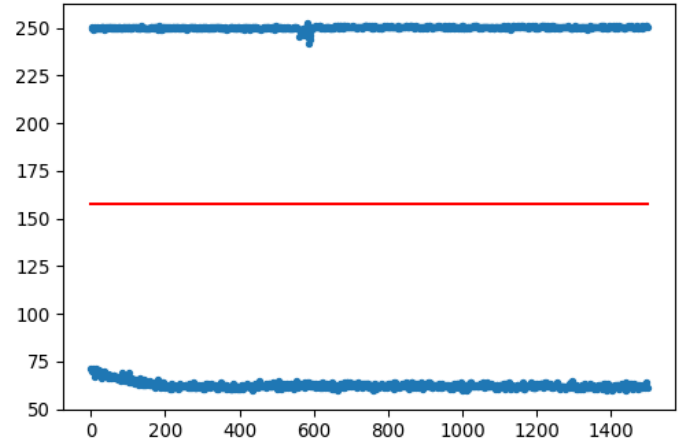


FIGURE 19: Disparition du phénomène de désynchronisation pour un échantillonnage à $50kHz$

Affichage des messages détectés : L'affichage de l'ensemble des messages détectés est un bon moyen pour savoir s'il est possible à un moment donné de trouver le message attendu si le message corrigé n'est pas correct. De plus, cela permet de voir les erreurs qui peuvent se produire sur chacun des messages lors de la transmission. Il est alors possible de détecter l'origine de ces erreurs. En reprenant l'exemple de la figure 18 où le message attendu est 11, les messages détectés sont représentés sur la figure 20. On visualise bien la désynchronisation grâce à l'alternance de 0 et de 1 dans les messages détectés.

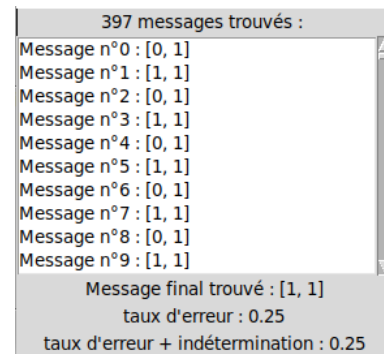


FIGURE 20: Visualisation des messages obtenus après analyse

Affichage des taux d'erreur : Dans le cas de l'utilisation d'un double seuil, les bits détectés ont trois états possibles : 0, 1 ou indéterminé. Deux taux permettant d'évaluer les messages décodés ont été mis en place. Le taux d'erreur est défini par le rapport du nombre de bits inversés par rapport au message attendu sur le nombre total de bits détectés. Le taux d'erreur + indétermination prend également en compte les bits indéterminés. C'est-à-dire qu'il est défini

par le rapport du nombre de bits différents du message attendu sur le nombre total de bits détectés.

Les bits indéterminés ne faussant pas la correction du message, ils sont moins gênant que des bits erronés (inversés par rapport à ceux attendus). Un taux d'erreur + indétermination élevé n'est donc pas trop gênant tant que le taux d'erreur est bas.

Sur la figure 21 reprenant l'exemple précédent avec un double seuil, on remarque que malgré un fort taux d'erreur + indétermination, le taux d'erreur est nul, ce qui permet la bonne détection du message.

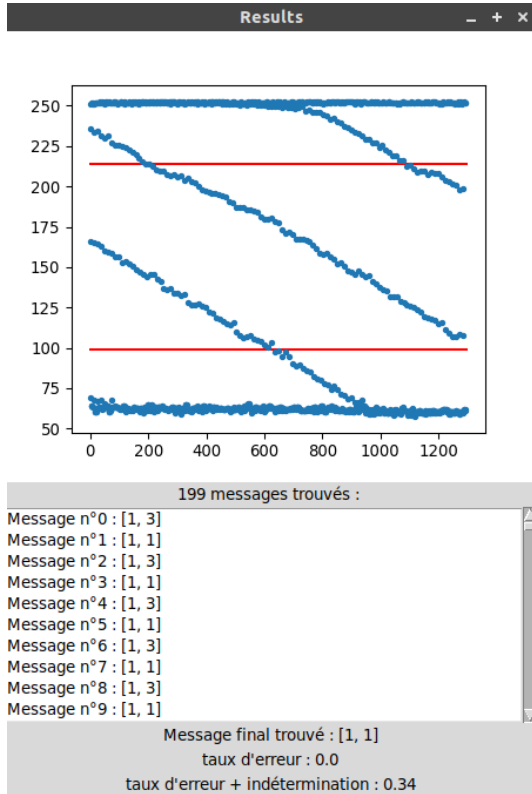


FIGURE 21: Visualisation des taux obtenus après analyse

V. CONCLUSION

Dans cette étude, de nombreux paramètres ont été testés afin de permettre la transmission de données grâce à une LED et une caméra CMOS. Bien que la méthode définitive ne soit pas encore trouvée, cette étude a permis d'obtenir des premiers résultats satisfaisants.

Afin de trouver le message durant la vidéo, l'en-tête joue un rôle important et il ne doit pas être confondu avec le corps du message.

L'existence d'erreur lors du décodage de la vidéo n'étant pas nulle, la répétition du message est alors très utile afin d'avoir une correction efficace et d'obtenir le bon message.

La raison de la mauvaise transmission a été trouvée et serait due au matériel actuel qui ne peut pas générer une assez haute fréquence. En effet, en augmentant la fréquence au delà de $40kHz$, le matériel impose la transmission d'un nombre de bit de plus en plus réduit, voire unique. Or ce n'est pas acceptable pour l'utilisation attendue de ce type de communication. La fréquence d'échantillonnage actuelle induit donc des erreurs dans les messages décodés et ne permet pas d'analyser correctement les vidéos.

Cette étude a aussi permis la création d'un logiciel permettant décoder le message dans les vidéos. Ce logiciel est adaptable selon les paramètres utilisés pour la transmission et permet de déterminer et comprendre certains problèmes tels que la désynchronisation ou la non-reconnaissance de l'en-tête.

Le logiciel est encore en cours de développement et certaines fonctionnalités sont à intégrer afin d'aider et faciliter la compréhension des problèmes de transmission du signal. Il serait utile de définir plusieurs niveaux d'indétermination d'un bit et d'amélioration de l'algorithme de correction. Le niveau d'indétermination d'un bit permettrait de connaître l'état à l'origine de l'indétermination (le premier, le deuxième ou même les deux). L'amélioration de l'algorithme de correction des messages s'appuierait alors sur les précisions apportées aux indéterminations. D'autres fonctionnalités pourraient permettre une meilleure adaptabilité du logiciel à son environnement dans le cadre d'une utilisation en situation réelle. Parmi celles-ci, la localisation automatique de la LED dans une image et la déduction automatique de la taille de la ROI faciliterait le décodage en temps réel du signal. Par ailleurs, le traitement simultané de plusieurs LED dans l'image (sans que la luminosité des unes influe sur celle des autres) assurerait un usage plus réaliste de cette technologie.

Dans une prochaine étude, les essais concernant la génération et l'envoi d'un signal pourront être poursuivis en corrigeant les paramètres identifiés dans cet article. L'utilisation d'un générateur pouvant aller au delà $50kHz$ pourra par exemple être testé et permettra d'affirmer ou d'infirmer la cause de la mauvaise transmission de l'information.

RÉFÉRENCES

- [1] "Ieee standard for local and metropolitan area networks—part 15.7 : Short-range wireless optical communication using visible light," in *IEEE Std 802.15.7-2011*, 2011, pp. 1–309.
- [2] L. Florent, F. Seguel, K. Nicolas, C. Patrick, and P. Bertrand, "Multiple speaker localization and identification through multiple camera and visible light communication," in *LIFI Congress (GLC), 2018 Global*. IEEE, 2018, pp. 1–4.
- [3] P. Luo, M. Zhang, Z. Ghassemlooy, S. Zvanovec, S. Feng, and P. Zhang, "Undersampled-based modulation schemes for optical camera communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 2, pp. 204–212, 2018.

- [4] R. D. Roberts, “Undersampled frequency shift on-off keying (ufsook) for camera communications (camcom),” in Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2013 22nd. IEEE, 2013, pp. 645–648.
- [5] N. Saha, M. S. Ifthekhar, N. T. Le, and Y. M. Jang, “Survey on optical camera communications : challenges and opportunities,” Iet Optoelectronics, vol. 9, no. 5, pp. 172–183, 2015.
- [6] C. Danakis, M. Afgani, G. Povey, I. Underwood, and H. Haas, “Using a cmos camera sensor for visible light communication,” in Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE. IEEE, 2012, pp. 1244–1248.

ANNEXE

Tableau résumant les paramètres d’acquisition et d’analyse des vidéos citées dans l’article :

Figure	Figure 14	Figure 17	Figure 18	Figure 19	Figure 21
Message transmis	X	X	11	0	11
En-tête	X	X	1xx0xx	X	1xx0xx
Distance LED-caméra	1m et 2m	35cm	1m	1m	1m
Taille de la ROI	X	60 pixels	15 pixels	15 pixels	15 pixels
Position de la ROI	X	X	(483,547)	(483,547)	(483,547)
Marge d’erreur	X	0	0	0	0,6
Fréquence d’échantillonnage du signal	X	X	40kHz	50kHz	50kHz