

Détection de défaillance de leds dans les feux de signalisation ferroviaires

Ing. A. DEGREZ
Dr. J.-B. COULAUD
ISICht – Mons

Afin d'assurer un fonctionnement en toutes circonstances et pouvoir compter sur un retour d'informations fiable quant à l'état des futurs feux de signalisation ferroviaires à leds, un dispositif de détection de défaillance optique doit être mis au point. Partant d'un prototype de feu à leds, l'objectif de cet article est de sélectionner, expérimenter et mettre en place différentes solutions pour la conception d'un système fiable, économique et insensible aux perturbations.

Mots-clés: optique, diodes électroluminescentes, capteurs photoélectriques, défaillance, traitement fréquentiel, perturbations lumineuses.

Aiming to ensure the operation in every situation and to collect reliable data about conditions of future LED railway signalling lights, an optical failure detection system has to be developed. Starting from a prototype of LED signalling light, the aim of this article is to select, to test and to implement different solutions for the design of a reliable, economical and insensitive to ambient light disturbances system.

Keywords: optics, Light-Emitting Diodes, photoelectric sensors, failure, frequency processing, light disturbance.

1. Introduction

À ce jour, les diodes électroluminescentes, plus communément appelées « leds » (de l'anglais: Light-Emitting Diode), deviennent omniprésentes et remplacent peu à peu les éclairages à incandescence fort énergivores. Ces derniers sont amenés à disparaître complètement à plus ou moins court terme dans de nombreux domaines et le secteur ferroviaire n'a, lui non plus, pas de raison de déroger à cette règle.

Le présent article, tiré du travail de fin d'études [5] réalisé au centre de recherche en énergie et mécatronique (CEREM), appartenant à l'Université Catholique de Louvain (UCL), s'inscrit dans la continuité d'un précédent travail de fin d'études réalisé par un étudiant de l'UCL [9]. Ces travaux ont tous deux été menés autour d'un projet de recherche obtenu par le CEREM, en partenariat notamment avec la société *Alstom*, très active dans le domaine ferroviaire.

La finalité du projet vise à remplacer à terme l'ensemble des feux de signalisation à incandescence présents sur le réseau ferroviaire par des feux à leds. Cette technologie en pleine expansion possède de nombreux avantages dont le premier, et non des moindres, concerne leur très faible consommation énergétique. En outre, il est généralement admis que ces dernières peuvent fonctionner durant 50.000 heures, contre environ 1.000 pour les ampoules classiques, soit au moins 50 fois plus longtemps. En tenant également compte de leur robustesse, cela constitue autant d'éléments qui permettent de faire des économies, tant sur le plan de la maintenance, que sur celui de la consommation électrique.

L'un des principaux objectifs de ce projet est donc bien économique mais la fiabilité et la sécurité jouent également un rôle très important dans les dispositifs de signalisation. Par le passé, des défauts dans ce mode de signalisation ont déjà été mis en cause dans un certain nombre d'accidents. C'est pourquoi, un système de détection de défaillance de leds devra être mis en place afin de bénéficier d'un retour d'information quant au bon fonctionnement de ces feux de signalisation.

La recherche avait déjà débuté (cf. [9]) avant le commencement de ce travail de fin d'études par le calcul de la puissance lumineuse nécessaire, débouchant sur le choix du type, du nombre et de l'emplacement des leds

nécessaires. Cette partie de l'étude incluait également les aspects liés à la conception des lentilles prévues pour surmonter les leds et diriger ainsi le faisceau lumineux dans le respect des normes imposées. Au terme de cette première analyse, une maquette d'essai comportant 9 leds rouges avait été réalisée afin de valider le fonctionnement de l'ensemble.

2. Problématiques à résoudre

2.1. Modes de défaillance des leds

L'utilisation des leds dans les feux de signalisation ferroviaires présente des intérêts indéniables, tant au niveau économique que de la fiabilité. Néanmoins, l'indispensable dispositif de surveillance à mettre en place est plus complexe que pour les ampoules à incandescence. La raison de cette complexité est due aux différents modes de défaillance inhérents à la technologie led :

- Défaillance en circuit ouvert. Ce premier mode intervient également dans les ampoules à incandescence lorsque le filament se rompt. Dans chacun des deux types de sources lumineuses, une mesure de courant suffit à détecter un tel défaut.
- Défaillance en circuit fermé. Ce mode n'est pas présent avec les ampoules classiques et résulte d'un court-circuit au sein du semi-conducteur. Cette défaillance peut également être détectée au moyen d'une mesure de courant ou de tension.
- Défaillance par perte de luminosité au fil du temps. Ce phénomène survient également avec de nombreux types de luminaires mais la faible durée de vie de ceux-ci permet d'en négliger les effets. En revanche, il s'agit de la cause la plus probable de défaillance des leds. Comme l'illustre la figure 1, la durée de vie des leds est généralement renseignée comme étant la durée pendant laquelle au moins 70 % (ou parfois 50 % selon les fabricants) du flux lumineux initial est encore émis.

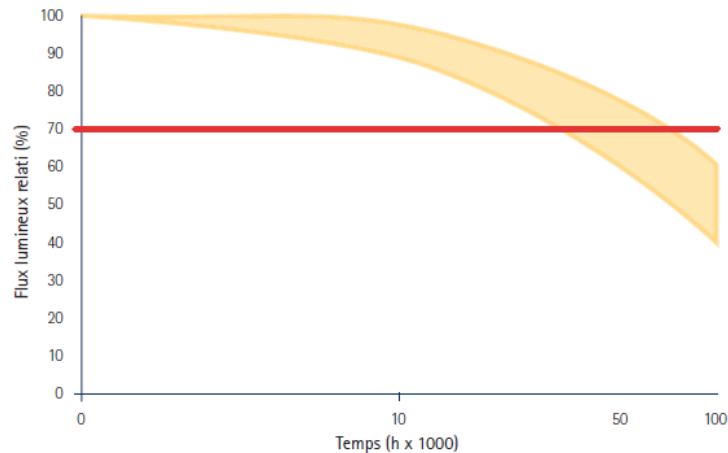


Figure 1 - Perte de luminosité des leds [6]

Certes, le signal lumineux n'est alors pas complètement éteint mais les normes d'éclairage ne sont plus respectées. La détection de ce dernier mode de défaillance est donc également nécessaire.

De plus, et c'est là tout l'objet de l'article, cette perte de luminosité survient sans aucune modification des caractéristiques électriques du composant. Cela impose le recours à un autre type de mesure. Les caractéristiques d'entrée de la led ne renseignant aucune information exploitable dans ce cas, c'est l'effet produit par le composant, à savoir, la lumière, qui va devoir être mesurée par voie optique, avec toutes les difficultés supplémentaires que cela engendre.

En outre, ces pertes de luminosité, au commencement du phénomène et à l'échelle d'une seule led, sont minimales. Le système de détection devra donc présenter une sensibilité suffisamment élevée pour qu'il soit apte à déceler une anomalie le plus rapidement possible.

2.2. Impact des perturbations lumineuses

La principale difficulté des mesures optiques est qu'elles sont fortement dépendantes de l'environnement dans lequel elles sont effectuées. Dans le cas présent, le faible éclairage des leds doit être mesuré. Or, à moins d'envisager la réalisation des mesures dans l'obscurité la plus totale, l'éclairage ambiant sera inévitablement superposé à l'éclairage à mesurer.

Ces perturbations proviennent non seulement de l'éclairage public, mais également du soleil qui, en plus d'avoir une puissance d'éclairage très importante, possède également un spectre d'émission très large (fig.2), contrairement aux leds qui sont quasiment monochromatiques (625 nm pour le modèle rouge qui est utilisé [10], voir figure 3). Ainsi, il émet énormément d'infrarouges auxquels la plupart des capteurs optiques sont sensibles (comme sur la figure 4 qui montre le spectre de réception du modèle de capteur TAOS® TSL 25*R [12] dont il sera question plus loin).

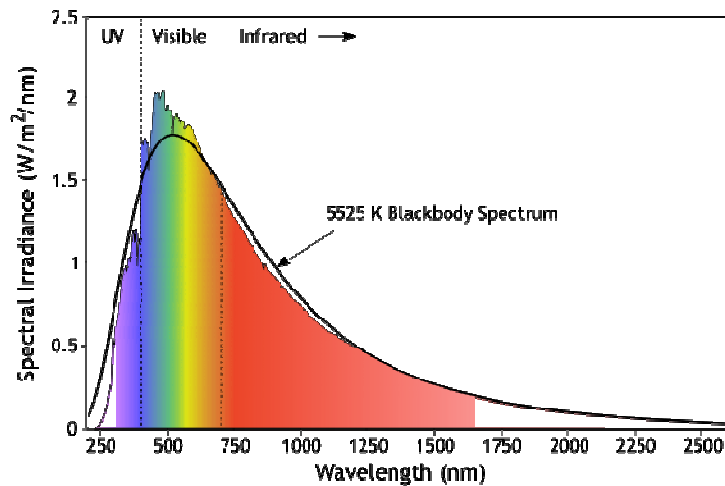


Figure 2 - Spectre d'émission du soleil [4]

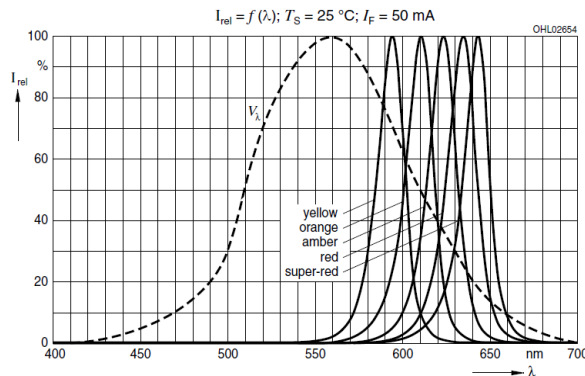


Figure 3 - Spectre d'émission des leds [10]

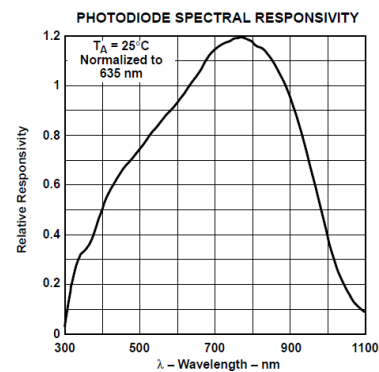


Figure 4 - Spectre de réception capteur [12]

La solution idéale serait de pouvoir isoler totalement les capteurs optiques des sources de lumière externes perturbatrices, tout en étant capable de mesurer l'éclairage des leds de façon précise. Malheureusement, malgré les différentes techniques envisagées, il est impossible de s'affranchir totalement de ces perturbations.

Pour cette raison, plusieurs moyens d'action sont envisagés à différents endroits de la chaîne de mesure. Tout d'abord, dans le but de pouvoir différencier l'éclairage extérieur du signal lumineux en provenance des leds, ce dernier doit être pulsé de manière à pouvoir être filtré et isolé une fois la conversion en signal électrique effectuée par le capteur. Cela est entièrement nécessaire mais ne résout toutefois pas le problème du soleil qui a tendance à saturer le capteur si aucune autre disposition n'est appliquée. Il s'agit alors de limiter autant que possible l'accès des rayons solaires au capteur, tout en ayant la possibilité de mesurer de très faibles variations d'éclairage issues des leds.

L'article va dès lors être scindé en trois parties, bien que largement interdépendantes, détaillant chacune les actions à mener à un endroit différent de la chaîne de mesure:

- La première intervient à la source même de l'éclairage à mesurer. Elle a pour objectif de déterminer le type d'alimentation adéquat des leds, non seulement pour permettre la distinction de leur signal parmi les perturbations lumineuses, mais également pour assurer une alimentation adaptée à ces composants particuliers et une consommation énergétique minimum.
- La deuxième agit au niveau physique et optique, sur les signaux lumineux, avant qu'ils n'atteignent le capteur, dans le but de maximiser le rapport signal à bruit. Le signal des leds doit être dirigé vers le capteur, tandis que l'éclairage perturbateur extérieur ne doit pas l'atteindre ou, en tous cas, doit être atténué autant que possible.
- La troisième concerne le conditionnement et le traitement du signal électrique fourni par le capteur.

3. Alimentation électrique du système

À l'état initial du projet (cf. [9]), la première maquette réalisée était pourvue des 9 leds rouges [10] (munies chacune d'une lentille) alimentées en parallèle via des résistances, uniquement afin d'effectuer quelques essais. Pour satisfaire aux exigences d'éclairage, il était donné que chaque composant doit être parcouru par un courant d'environ 27 mA, sous une tension de 2 V, conformément à la courbe caractéristique de la figure 5.

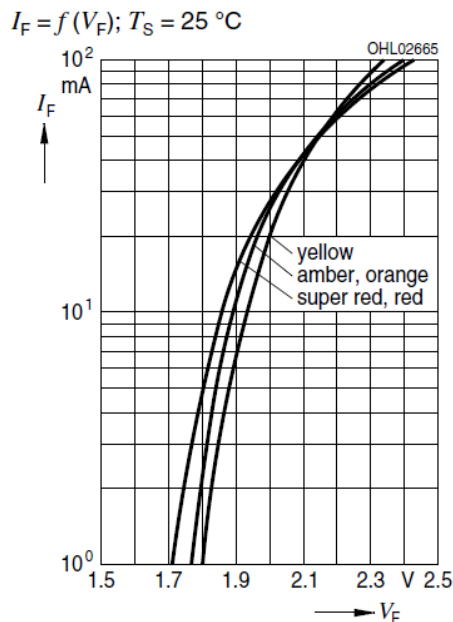


Figure 5 - Caractéristique des leds Osram Power Topled L*E6SF [10]

En revanche, la présence d'une résistance de limitation du courant par led est loin d'être la solution la plus économe en énergie. C'est pour cette raison qu'une méthode d'alimentation plus adaptée du feu doit être définie, tout en étant compatible avec le dispositif de détection de défaillance.

3.1. Forme du signal électrique

Le soleil, et plus généralement l'éclairage extérieur au feu, tel que par exemple, l'éclairage public, l'éclairage en gare et les phares des trains, est l'un des éléments perturbateurs les plus influents pour les mesures optiques.

L'éclairement solaire est continu et plutôt constant, il varie selon les conditions météorologiques mais de manière relativement lente. L'éclairage public est, quant à lui, généralement alimenté sous tension alternative sinusoïdale à une fréquence de 50 Hz. Les alternances négatives de cette tension sont « redressées » naturellement puisque la lumière ne peut pas être négative. Le capteur optique reçoit donc l'équivalent d'un signal plus ou moins sinusoïdal en fonction de l'inertie de la source lumineuse, et qui, comme le montre la figure 6, est redressé en double alternance, portant ainsi sa fréquence à 100 Hz.

Il a déjà été signalé que ces perturbations lumineuses ne pourront pas être complètement supprimées avant leur conversion en signal électrique par le capteur optique. Ce faisant, le signal récupéré à la sortie du capteur sera constitué de la somme des éclairements des leds et de l'éclairage extérieur, et ce, sans plus aucune possibilité de distinction des deux composantes si elles sont de même forme. Il apparaît donc essentiel de différencier la forme du signal des leds de celui de l'éclairage ambiant avant même leur entrée dans le capteur. La solution d'un signal pulsé à une fréquence suffisamment élevée s'impose alors comme une évidence. De plus, les leds supportent très bien un tel pilotage. La figure 6 prouve que le signal pulsé des leds est reconnaissable parmi les autres puisqu'ils n'ont pas la même forme, ce qui n'aurait pas été le cas avec une alimentation continue.

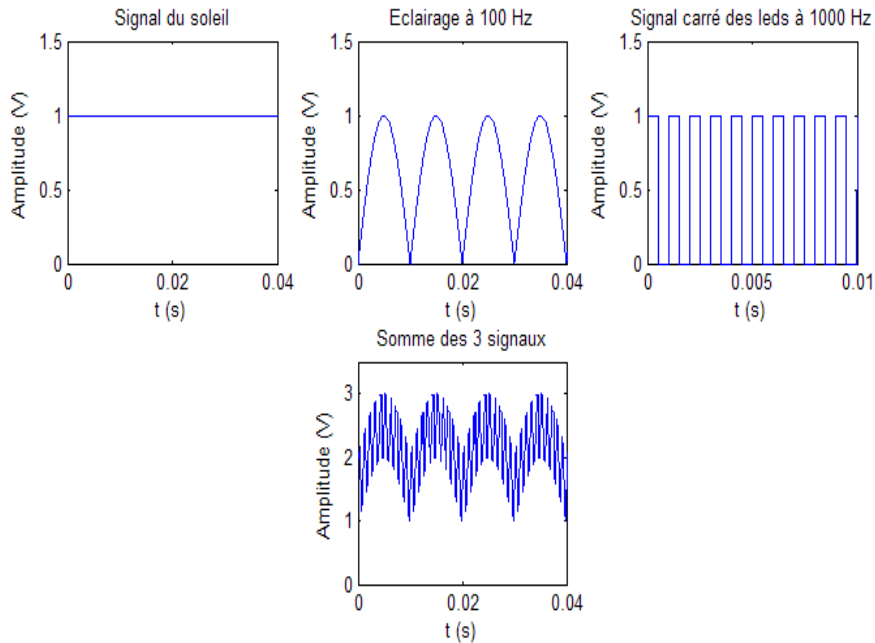


Figure 6 - Signaux des 3 sources de lumière ainsi que leur somme

La fréquence de commande des leds doit être suffisamment élevée, d'une part, pour que la persistance rétinienne de l'œil humain fasse en sorte que les clignotements ne soient pas perçus et, d'autre part, pour que le filtrage de l'éclairage ambiant soit facilité.

Cette manière de procéder par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM¹) revêt un intérêt double puisque, outre le fait que l'origine des signaux peut être identifiée, il est également possible de faire varier l'éclairage des leds en jouant sur le rapport cyclique du signal appliqué. Une compensation du flux lumineux pourra dès lors être envisagée en fonction de la perte de luminosité mesurée pour accroître encore la longévité des feux de signalisation.

¹ De l'anglais : *Pulse Width Modulation*

3.2. Source et schéma d'alimentation électrique

Il est à présent acquis que le signal des leds sera pulsé mais il reste néanmoins à définir de quelle manière.

Sans entrer dans le détail des méthodes d'alimentation des leds, puisque cela ne fait pas l'objet de cet article, une led doit être contrôlée en courant (consulter [7] pour plus de précisions à ce sujet). Une alternative couramment employée lorsqu'une « vraie » source de courant n'est pas disponible est de placer une résistance de limitation du courant en série avec une source de tension, comme c'était le cas sur la première maquette d'essai. Cette façon simple de procéder entraîne une dépense d'énergie inutile sous forme de chaleur au sein de cette résistance. L'utilisation d'une source de courant semble donc plus adaptée ici pour rester en accord avec les économies d'énergie désirées. De plus, sachant que le signal d'alimentation électrique sera pulsé et qu'il proviendra d'une carte à microcontrôleur, la mise en place d'une source de courant n'amènera pas de contraintes particulières.

La fiche technique des leds employées [10] indique que le courant maximum supporté en régime continu est de 70 mA. Sachant que le courant nominal moyen désiré est de 27 mA, le rapport cyclique doit être de :

$$\frac{I_{moy}}{I_{max}} = \frac{27 \text{ mA}}{70 \text{ mA}} = 0.386 \approx 40 \%$$

En ce qui concerne le schéma d'alimentation, de nombreuses possibilités existent. Les 9 leds peuvent être connectées en série, en parallèle, ou encore selon divers groupements mixtes, utilisant une ou plusieurs sources d'alimentation.

Sur ce dernier point, toujours par souci d'économie, le recours à une source de courant unique est préférable.

L'alimentation de toutes les leds directement en parallèle semble *a priori* satisfaisante puisqu'un éventuel défaut en circuit ouvert de l'une des leds laisse toujours aux autres la possibilité de fonctionner. Néanmoins, cette disposition est proscrite en raison de la divergence des caractéristiques des composants semi-conducteurs, même au sein d'un lot commun. Le courant, et donc l'éclairage, seraient alors répartis de manière totalement inégale entre les différentes leds, ce qui rendrait impossible un contrôle précis du feu.

Sur ce point, la connexion de l'ensemble des leds en série est la plus adaptée. En effet, le courant traversant l'ensemble des composants reste le même, quelles que soient les caractéristiques des différents éléments, ce qui assure une luminosité parfaitement équilibrée. Toutefois, cette configuration présente le gros inconvénient d'entraîner l'extinction de tous les éléments de la chaîne en cas de défaillance en circuit ouvert d'une seule led.

Heureusement, il existe un moyen efficace de pallier à ce désagrément majeur. Il s'agit de placer une diode Zener, montée en inverse, en parallèle à chaque led pour constituer une dérivation suffisante pour laisser passer le courant alimentant les leds encore fonctionnelles, comme sur le schéma de la Figure 7.

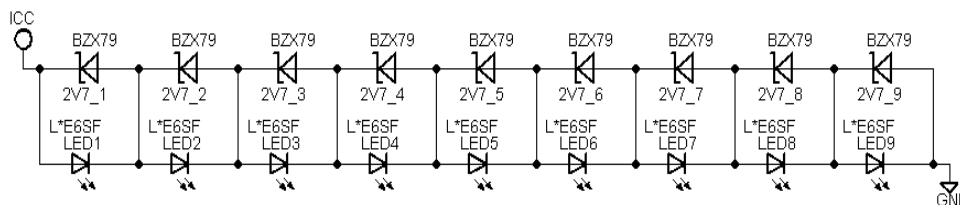


Figure 7 - Circuit d'alimentation des leds en série

D'après les caractéristiques des leds (fig.5) la tension directe des composants sous un courant de 70 mA est d'environ 2,25 V. Pour 9 leds en série, la tension nécessaire aux bornes de la chaîne est donc de 20,25 V. Une source de courant fonctionnant jusqu'à 24 V, qui est la tension habituellement employée, est donc suffisante.

Au final, le schéma sera donc constitué de 9 leds Osram Power Topled L*E6SF [10] en série et de 9 diodes Zener BZX79-C2V7. La société *Alstom* se chargera de fournir une source de courant avec possibilité de pilotage PWM. Cette alimentation devra être capable de fonctionner jusqu'à 24 V avec un courant de 70 mA régulé et pulsé avec un rapport cyclique nominal de 40 %.

La détermination du circuit d'alimentation des leds, ainsi que de la plupart des paramètres nécessaires à la conception de l'alimentation adéquate ayant été effectuée, il est temps de passer à l'étude de la partie optique du système. Cette dernière agira, elle, avant l'entrée des signaux lumineux dans le capteur, contrairement à tous les dispositifs ayant été mis en place jusqu'à

présent, afin de pouvoir séparer ultérieurement les différentes composantes lumineuses après leur conversion par le capteur.

4. Optimisation de la détection optique

Le dispositif optique de détection de défaillance des leds constituant le feu de signalisation doit être capable de mesurer la présence de très faibles éclairagements provenant des leds parmi les perturbations lumineuses parfois intenses de l'éclairage extérieur au feu. C'est donc toute cette problématique de maximisation du signal des leds et de limitation de l'influence de l'éclairage extérieur qui va à présent être étudiée.

Avant cela, il faut savoir que les capteurs optiques utilisés pour tous les essais de cette partie « optique » sont les modèles TAOS[®] TSL 25*R [12] choisis pour leur facilité de mise en œuvre.

Plusieurs options ont été envisagées concernant le nombre et l'emplacement de ces différents capteurs. La solution retenue consiste à disposer un capteur au centre de chaque groupement de 4 leds, contre le circuit imprimé supportant ces dernières, comme le montre le schéma de la figure 8.

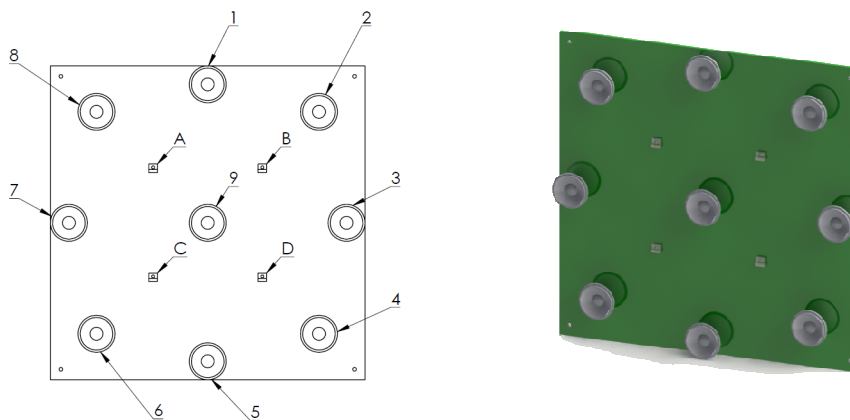


Figure 8 - Positionnement des 4 capteurs

Ces capteurs (A, B, C et D) sont orientés dans la même direction que les leds dans le but de minimiser leur nombre et d'exploiter le phénomène de diffusion de la lumière qui va maintenant être abordé.

4.1. Amélioration de la mesure de l'éclairage des leds

Dans le but d'améliorer la réception des signaux lumineux, l'une des premières idées fut de placer un matériau diffusant devant les lentilles dans le but de rediriger une partie de la lumière vers les capteurs, comme à la figure 9. Le phénomène de diffusion (ou plus exactement, de réflexion diffuse) renvoie dans de multiples directions un faisceau lumineux qui vient heurter la surface ayant des propriétés diffusantes, contrairement à la réflexion spéculaire qui ne fait que renvoyer le rayon incident dans une seule direction, et serait donc beaucoup plus compliqué à régler avec précision.

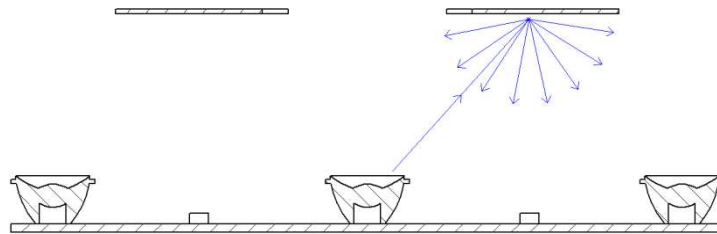


Figure 9 - Phénomène de diffusion recherché

Pour étudier ce phénomène de diffusion, plusieurs types de matériaux (en forme d'anneau pour laisser passer la lumière des leds et conserver ainsi le feu de signalisation visible), avec des états de surface différents, ont été disposés devant les lentilles allumées afin de relever la tension du capteur donnant une indication des propriétés diffusantes de la matière utilisée. Ces mesures ont été réalisées en chambre noire à une distance variable du circuit imprimé (voir la figure 10).

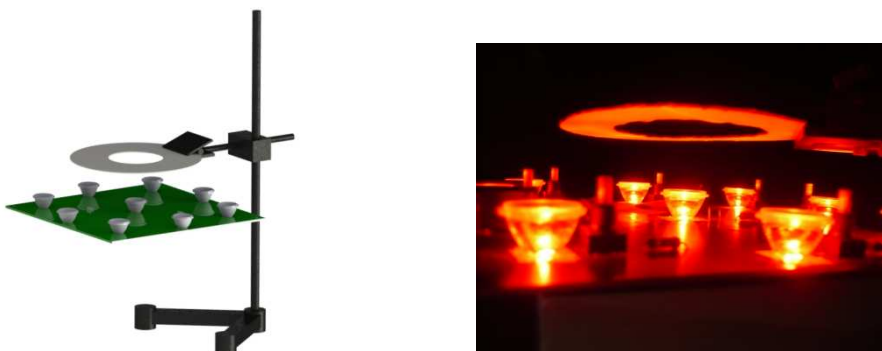


Figure 10 - Illustration des essais de matériaux diffusants

Parmi les matériaux employés (carton, polyamide et divers types de Plexiglas[®]), peu de différences ont été ressenties, à l'exception du Plexiglas[®] nettement moins efficace. C'est pourquoi, par facilité, le carton a été majoritairement utilisé pour les essais, tout en sachant que le polyamide, dont le comportement était très similaire, serait privilégié dans le cas d'une industrialisation du dispositif.

En chambre noire, cette configuration utilisant un anneau diffusant permet tout à fait d'obtenir une information exploitable quant à l'état des leds, mais la présence d'une source d'éclairage externe a pour effet de saturer rapidement le capteur ou, en tous cas, de réduire fortement sa dynamique. En effet, sous une tension d'alimentation de 5 V, ce type de capteur renvoie une tension de 0 à environ 3,3 V. Si, par exemple, une lampe extérieure éclaire le capteur de manière à ce qu'il renvoie une tension de 2 V, la mesure de l'état des leds n'est plus possible que sur une échelle totale de seulement 1,3 V, ce qui limite fortement les possibilités de détection.

Il est donc indispensable de trouver une solution permettant à la fois d'augmenter l'amplitude du signal lumineux reçu par le capteur, comme cela vient d'être fait, tout en étant, dans la mesure du possible, le moins sensible à l'éclairage extérieur au feu, et en particulier au soleil.

4.2. Réduction de l'influence de l'éclairage extérieur

L'idée de la diffusion de la lumière des leds semble *a priori* satisfaisante, mais il faut encore améliorer ce principe de manière à rendre le système moins sensible à l'éclairage ambiant.

Les très faibles variations de luminosité à mesurer sur les leds obligent l'utilisation d'un capteur très sensible. Or, de ce fait, la présence d'une source lumineuse de plus forte intensité que les leds a tendance à saturer le capteur très rapidement, rendant toute détection de défaillance impossible.

Un remède envisageable à cela est de disposer un cache opaque contre le plan supérieur des lentilles de manière à rendre les capteurs nettement moins sensibles à l'éclairage ambiant, comme sur la figure 11.

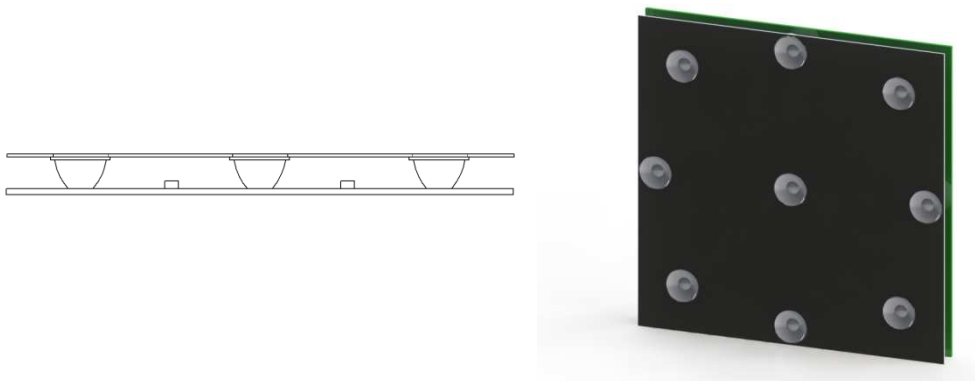


Figure 11 - Cache diffusant contre les lentilles

En dotant la face interne (celle orientée vers les capteurs) de ce cache de propriétés diffusantes, il est possible de combiner, à la fois la réduction de l'influence de l'éclairage extérieur, et en même temps, l'amélioration de la mesure du signal des leds.

Ce cache permet déjà de réduire très nettement l'impact de l'environnement extérieur, mais une partie de cette lumière parvient tout de même à passer au travers des lentilles qui sont transparentes. Il faut donc trouver d'autres méthodes supplémentaires afin de réduire le passage de la lumière extérieure au feu vers le capteur.

À ce niveau, plusieurs pistes ont été envisagées, dont l'emploi de fibres optiques pour canaliser la lumière ou l'utilisation de filtres optiques dans le but d'isoler uniquement la longueur d'onde émise par les leds. Ces solutions ont néanmoins été rapidement écartées pour des raisons de faisabilité technique ou des raisons économiques, étant donné la finalité industrielle du projet.

En revanche, pour rester sur l'idée du filtrage optique, mais à un coût raisonnable, un changement de modèle de capteur s'impose. En effet, malgré sa simplicité d'emploi, le composant employé jusqu'ici [12] présente un spectre de réception relativement large (représenté à la figure 4), et en particulier dans le domaine infrarouge, là où précisément le soleil dégage une part importante de sa puissance.

Le choix s'est donc porté sur la photodiode Osram SFH 2270R [11] dont le spectre de réception est représenté en figure 12.

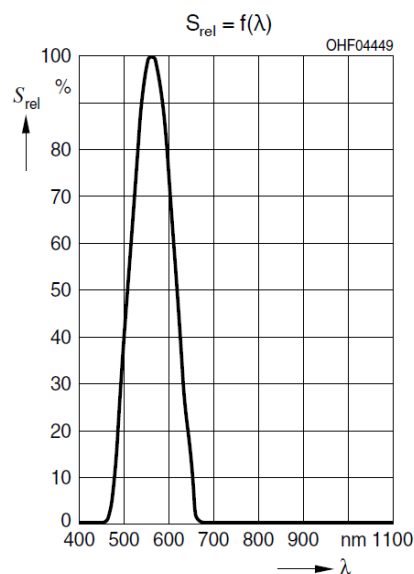


Figure 12 - Spectre de réception photodiode Osram SFH 2270R [11]

Voilà pourquoi les nombreuses mesures ayant recours aux dispositifs de filtrage optique n'ont pas été détaillées davantage précédemment. Avec un capteur dont le spectre de réception est réduit, l'emploi de filtres optiques est inutile.

Au terme de cette partie traitant essentiellement des aspects optiques du système, avec les différentes manières d’agir sur les signaux lumineux avant leur entrée dans les capteurs, la configuration physique du feu peut être fixée et ne devrait plus subir de modifications. Les éléments restant encore à étudier interviennent davantage au niveau électrique et électronique sur les signaux issus des capteurs qu’il va falloir à présent décoder afin d’en extraire l’information sur l’état de fonctionnement du feu.

La figure 13 (vue en coupe) et la figure 14 (vue éclatée) donnent un aperçu de ce à quoi la version finale complète du dispositif devrait ressembler. En effet, le cache, ainsi que le circuit imprimé supportant les leds, les lentilles et les capteurs, sont prévus pour être intégrés facilement aux boîtiers de feu existants, en remplacement de l’ampoule à incandescence. Pour la suite de l’étude, une seconde maquette a été conçue de manière à s’approcher au mieux de cet objectif.

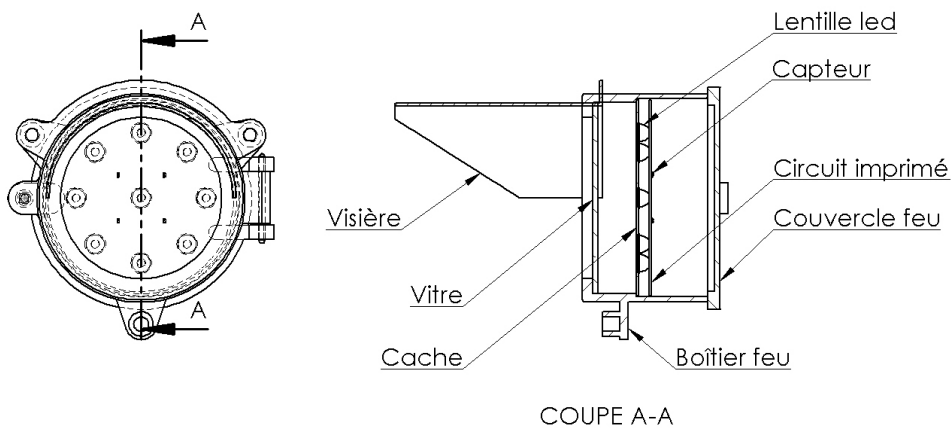


Figure 13 - Vue en coupe du feu

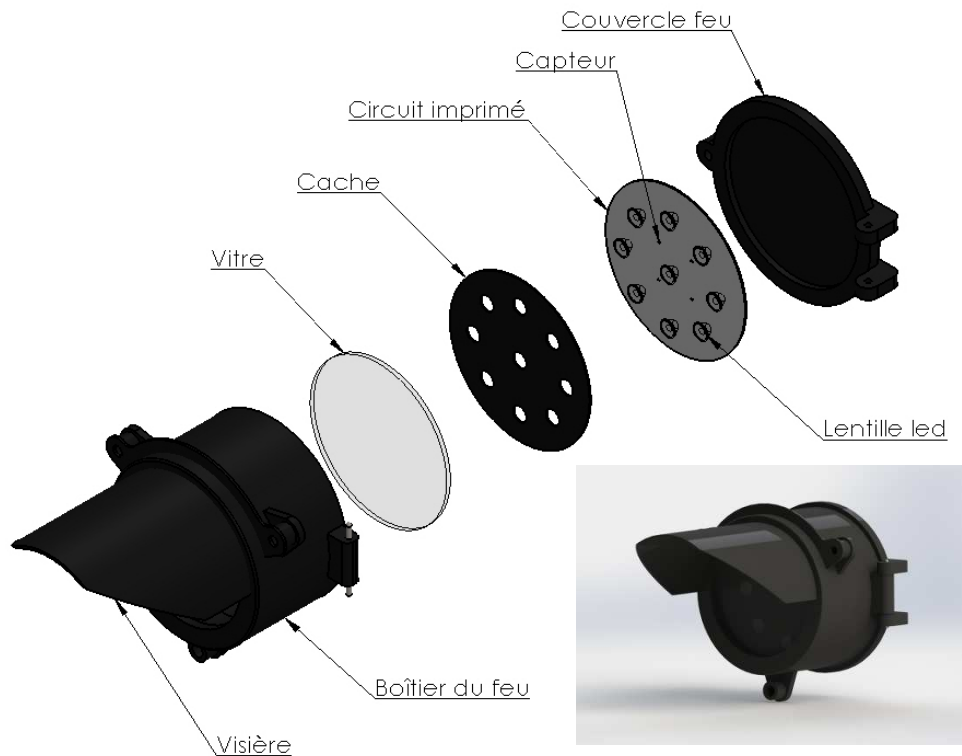


Figure 14 - Vue éclatée du feu

La mise en place du cache diffusant contre les lentilles résout en partie les deux problématiques majeures qu'il y avait lieu de solutionner avant la conversion électrique de la lumière. Il permet d'agir à la fois en tant que « barrière » contre l'éclairage extérieur et comme moyen d'amélioration de la réception de l'éclairage des leds.

Le premier capteur TAOS[®], utilisé pour sa facilité d'emploi, a permis d'identifier les différents problèmes qui se posaient et d'envisager les solutions afin d'y remédier. Le signal électrique issu du nouveau capteur Osram nécessitant plus de traitement électronique que le premier, le point suivant va traiter de la mise en œuvre de ce capteur et du traitement électronique que devra subir le signal après sa conversion.

Cette dernière partie électronique est essentiellement prise en charge par *Alstom*, c'est pourquoi l'article va rester plus généraliste sur ce point en donnant essentiellement des analyses concernant le comportement du système ainsi qu'une ouverture vers des solutions envisageables.

5. Conditionnement et traitement du signal

5.1. Circuit de conditionnement

Contrairement au premier capteur utilisé qui délivrait à sa sortie une tension directement exploitable et proportionnelle à l'éclairement reçu, la photodiode, elle, se voit traverser par un très faible courant (de l'ordre du microampère), lorsqu'elle est soumise à un éclairement. Il y a donc nécessité d'adjoindre un amplificateur opérationnel, comme sur la figure 15, de manière à établir un montage assurant à la fois une amplification et une conversion courant-tension du signal obtenu. Le composant Microchip MCP6491 [8] a été choisi, non seulement pour ses caractéristiques, mais également pour la quantité d'informations disponible pour son utilisation dans un tel type de montage.

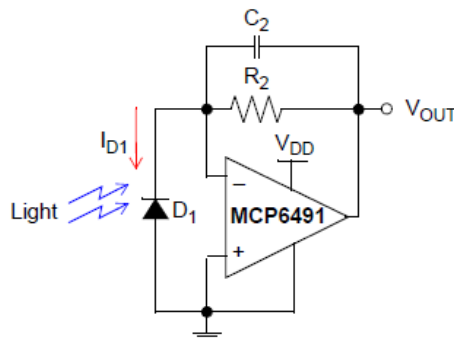


Figure 15 - Circuit de conditionnement pour photodiode [8]

D'après la note d'application [13] très détaillée de ce composant, la relation liant le courant traversant la photodiode à la tension obtenue à la sortie de l'amplificateur opérationnel de ce montage s'exprime simplement ainsi (en reprenant les notations de la figure 15):

$$V_{OUT} = R_2 \cdot I_{D1}$$

La tension de sortie du montage dépend donc uniquement de la valeur de la résistance de contre-réaction (R_2) à déterminer, et qui va essentiellement relever d'un compromis entre:

- d'une part, la sensibilité du montage et,
- d'autre part, sa capacité à mesurer dans de larges conditions d'éclairement.

Une résistance relativement faible permettra de mesurer une large gamme d'éclairement, et donc arrivera moins facilement à la saturation du montage, au détriment de la précision dans la détection de défaillance. Une résistance élevée présentera une meilleure sensibilité, rendant possible la mesure de très faibles variations d'éclairement, mais saturera rapidement le système pour peu que l'éclairage extérieur devienne plus intense.

5.2. Évaluation des caractéristiques du montage

De nombreuses mesures ont été effectuées afin de déterminer la sensibilité exacte du montage en fonction des résistances employées et d'étudier au mieux le comportement du système.

C'est ainsi, notamment, que les points suivants ont pu être étudiés, vérifiés et quantifiés:

- L'effet du cache diffusant et la sensibilité des différents éléments,
- L'aptitude du système à la mesure de faibles pertes d'éclairement,
- Le comportement en régime de lumière pulsée,
- Le comportement du feu face au soleil,
- L'impact des variations de température.

Sur ce dernier point, le recours à des composants semi-conducteurs fortement sensibles aux variations de température oblige à tenir compte de ce paramètre lors du traitement du signal. Compte tenu du fait de l'utilisation d'un microcontrôleur, une compensation logicielle, rendue possible en disposant un capteur de température au sein du feu, semble la plus adaptée dans ce cas.

En outre, l'ensemble des éléments abordés ont permis de constater que le fait d'opter pour une étendue de mesure suffisamment large était préférable à l'emploi d'une résistance trop élevée, impliquant une sensibilité trop importante pour le système étudié. En effet, dans le cas présent, il semble plus intéressant de pouvoir détecter une défaillance dans le plus grand nombre de conditions possibles avant que le système ne sature, plutôt que de vouloir mesurer une infime variation de luminosité. Un compromis acceptable d'une valeur de résistance tournant autour des 10 M Ω permet de déceler de suffisamment faibles variations d'éclairement des leds sous un éclairement extérieur de plus de 100.000 lx, approchant les valeurs maximales atteintes en plein soleil au moment de la journée et dans les conditions d'orientation du feu les plus défavorables.

5.3. Améliorations envisageables

Lors des précédentes mesures, la fréquence de commande des leds avait été limitée à 500 Hz. En accord avec ce qui a été énoncé plus haut, cette valeur devrait être beaucoup plus élevée afin de permettre un filtrage efficace et plus simple à mettre en œuvre. Cependant, les essais réalisés à différentes fréquences ne se sont pas avérés concluants. Plus la fréquence de commande des leds augmente, plus le signal semble atténué. Après investigations, ce phénomène serait dû à la bande passante de l'amplificateur opérationnel qui diminue de manière conséquente avec l'augmentation de la résistance.

Outre un changement de composant, une solution possible pour remédier à ce problème, tout en gardant malgré tout un rapport « tension/courant » total similaire et nécessaire pour conserver la sensibilité de la mesure, serait de diviser le circuit en plusieurs étages. Le gain de chaque étage pourrait alors être réduit et la bande passante serait alors plus importante pour chacun d'eux.

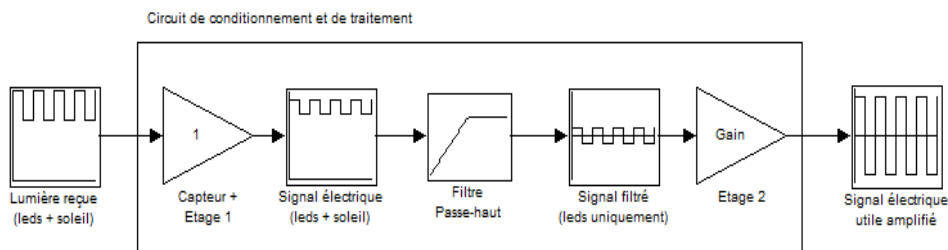


Figure 16 - Amélioration du montage avec deux étages amplificateurs

Par ailleurs, si ce dispositif s'avérait nécessaire, il pourrait être envisageable de donner une résistance très faible au premier étage, puis de réaliser le filtrage passe-haut du signal avant d'entrer dans le deuxième étage, comme illustré schématiquement à la figure 16. De cette manière, le premier amplificateur opérationnel ne saturerait jamais et le système serait donc opérationnel dans les conditions d'éclairage extérieur les plus défavorables. Le deuxième étage n'aurait plus alors qu'à amplifier le signal pulsé des leds, dont les valeurs limites sont bien définies, afin de pouvoir être exploité par le microcontrôleur de traitement.

6. Conclusion

L'objectif global poursuivi par le projet de recherche, à savoir le remplacement des lampes à incandescence par la technologie led, n'est pas aussi simple qu'il y paraît. Cela est d'ailleurs d'autant plus vrai dans le domaine de la signalisation ferroviaire, où la sécurité et la fiabilité de fonctionnement constituent des éléments primordiaux.

De nombreux compromis ont dû être réalisés, que ce soit d'un point de vue purement technique autant qu'économique, étant donné la finalité industrielle du projet et son objectif de réduction de coûts.

A l'issue de ce travail, la maquette réalisée permet effectivement de détecter la défaillance de leds, soit l'objectif principal de cet article. Le système résout également la problématique inhérente à la mesure optique puisqu'il est désormais capable de déceler de faibles pertes de luminosité des leds malgré la présence d'un éclairage extérieur. En outre, par l'usage de diodes électroluminescentes, ce dispositif permet de réaliser des économies d'énergie au vu de la faible puissance consommée par ces nouveaux composants. De plus, les leds devraient améliorer la sécurité du rail par leur moindre probabilité de défaut et par un retour d'information efficace.

Malgré toute l'attention portée à sa réalisation, le système proposé n'est pas parfait et une étude approfondie de certains aspects, dépassant parfois le cadre de cette partie du projet, au caractère initialement plus « électromécanique », devrait encore être envisagée. Cela concerne essentiellement le traitement électronique du signal issu des capteurs optiques. C'est pour cette raison que cette dernière partie du travail doit davantage être perçue comme étant des pistes d'investigations pour les commanditaires du projet, spécialistes en la matière, et qui se chargent de toute manière de l'acquisition et du traitement des signaux *via* leur propre carte de contrôle.

En outre, seuls des essais réels à l'aide d'un prototype final adoptant ses propres caractéristiques (dimensions, texture des matériaux diffusants,...) permettraient de déterminer les derniers réglages à effectuer afin d'obtenir la sensibilité et l'étendue de mesure désirées.

Finalement, au terme d'un parcours ayant emprunté nombre de chemins différents et parfois sans issue probante, une solution fonctionnelle a tout de même pu être élaborée.

7. Sources

- [1] ASCH, Georges *et al.*, 1996, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Paris, Dunod.
- [2] BENSON, Harris *et al.*, 2009, *Physique - Volume 3 - Ondes, optique et physique moderne*, Bruxelles, De Boeck, 4^e édition.
- [3] BENTLEY, John P., 1995, *Principles of measurement systems*, Harlow, Longman Scientific & Technical, 3rd édition.
- [4] CHANDLER, Charles (Consulté le 16.09.14), *Radiation*.
<http://qdl.scs-inc.us/2ndParty/Pages/10522.html>
- [5] DEGREZ, Anthony, 2014, *Détection de défaillance de leds dans les feux de signalisation ferroviaires*, Travail de fin d'études, Mons, HELHa.
- [6] ETAP, 2011, *Dossier LED – Éclairer avec une nouvelle source lumineuse*,
http://www.etaplighting.com/uploadedFiles/Downloadable_documentation/documentatie/LED_information/LED%20dossier_FR.pdf
- [7] MAYÉ, Pierre, 2001, *Optoélectronique industrielle. Conception et applications*, Paris, Dunod.
- [8] Microchip Technology Inc, 2012, *MCP6491, 7.5 MHz, Low-Input Bias Current Op Amps*. Datasheet.
- [9] MOREELS, Christophe, 2013, *La technologie led dans la signalisation ferroviaire*, Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade d'ingénieur civil, UCL.
- [10] Osram Opto Semiconductors. *Power TOPLED, Enhanced thin film LED, LS E6SF, LR E6SF, LA E6SF, LO E6SF, LY E6SF*, décembre 2010. Datasheet.
- [11] Osram Opto Semiconductors. *SFH 2270R, High Precision Ambient Light Photodiode*, juillet 2013. Datasheet.
- [12] Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc. *TSL250R, TSL251R, TSL252R Light-to-voltage optical sensors*, mai 2001. Datasheet.
- [13] ZHEN, Yang, 2013, *Using MCP6491 Op Amps for Photodetection Applications*. Microchip Technology Inc. AN1494.