



HAL
open science

Systèmes d'analyse de la récupération d'énergie lumineuse en intérieur pour l'alimentation d'objets connectés

Bastien Politi

► **To cite this version:**

Bastien Politi. Systèmes d'analyse de la récupération d'énergie lumineuse en intérieur pour l'alimentation d'objets connectés. Ingénierie de l'environnement. Université Montpellier, 2021. Français. NNT : 2021MONTTS004 . tel-03414940

HAL Id: tel-03414940

<https://theses.hal.science/tel-03414940>

Submitted on 4 Nov 2021

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En électronique

École doctorale I2S

Unité de recherche UMR 5214

Systemes d'analyse de la récupération d'énergie lumineuse en intérieur pour l'alimentation d'objets connectés

Présentée par Bastien POLITI

Le 12/03/2021

Sous la direction d'Alain FOUCARAN

Devant le jury composé de

Olivier BRIOT, Directeur de Recherche, L2C - UMR CNRS 5221

Raphaël CLERC, Professeur des Universités, Laboratoire Hubert Curien - UMR CNRS 5516

Jean-Jacques SIMON, Professeur des Universités, IM2NP - UMR CNRS 7334

Guylaine POULIN-VITTRANT, Directrice de Recherche, GREMAN - UMR CNRS 7347

Alain FOUCARAN, Professeur des Universités, IES - UMR CNRS 5214

Nicolas CAMARA, Maître de Conférences, EPF École d'Ingénieur de Montpellier

Mathias COMBELLE, Ingénieur, Morning (groupe BAP)

Président du Jury

Rapporteur

Rapporteur

Examinatrice

Directeur de Thèse

Encadrant de Thèse

Encadrant de Thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



Ces travaux de thèse CIFRE ont été réalisés grâce aux financements de l'entreprise Bureaux A Partager et de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). Ceux-ci ont été hébergés par l'Institut d'Electronique et des Système (IES) de l'université de Montpellier.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui m'ont encadrées durant mon travail de thèse. Alain Foucaran qui m'a fait confiance durant plus de trois ans et n'a jamais douté de ma capacité à réussir. Merci également à Nicolas Camara, dont la patience et la bienveillance m'ont permis de développer mes travaux avec une grande liberté. Tout en respectant mes préférences et mes choix, il a su me guider et me conseiller de manière à ce que je conserve un cap cohérent tout au long de ces trois ans et cinq mois. Bien sûr, Marie Piquemil qui m'a beaucoup aidée et encouragée au départ de ma thèse pour gagner en organisation et finalement en confiance dans mes capacités. Et finalement William Schaufelberger et Mathias Combelle qui ont accepté de m'accompagner, l'un après l'autre, dans mes travaux déjà bien avancés. Ils ont tous les deux fait preuve d'une grande écoute et ont été d'une grande aide pour arriver au terme de ce travail de longue haleine qu'est la thèse.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury de thèse qui ont accepté d'évaluer mon travail. Tout particulièrement pour le temps que chacun d'eux m'a accordé pour lire et commenter mon travail. Je tiens surtout à les remercier de leur bienveillance, celle-ci a fait de cette expérience de fin de thèse (pour le moins intense) un moment inoubliable, associé un fort sentiment d'accomplissement.

Il me faut également remercier les membres des organisations auxquelles j'ai été rattaché durant ces trois années. D'une part les personnes que j'ai côtoyées à l'IES, celles que j'ai rencontrées et qui m'ont suivi chez Bureaux A Partager et les membres de l'EPF de Montpellier avec qui j'ai pu travailler et discuter.

Je souhaite absolument remercier Christophe Rodiet, sans qui je n'aurais sans doute pas postulé pour ce projet de thèse. Ses encouragements et sa confiance en mes capacités, sans compter sa précieuse amitié, ont été un important moteur à la réussite de ce travail. Merci beaucoup Christophe.

Une pensée particulière me vient pour les doctorants et postdoctorants avec qui j'ai pu avancer, notamment Johnny El-Beyrouthy et Joanna Kret, avec qui nous avons formé un trio de choc ! Mais également mon presque co-bureaux Sébastien Peillon, qui est la

preuve vivante que malgré une forte adversité il est possible d'arriver à avancer et de s'en sortir (non sans mal !). Je remercie aussi Paul Oublon dont les histoires ont souvent été une source de distraction bienvenue. Je n'oublie pas non plus Seng Kian Chiah et Maroua Bouchneb qui ont toujours fait preuve de cette bonne humeur qui caractérise les chimistes faisant évaporer de l'alcool.

Le sage Rodolphe Vaillon doit également être remercié pour ses conseils, le recul et le calme qu'il m'a transmis.

Du côté de Bureaux A Partager, je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble de l'équipe. Malgré une présence à Paris qui s'est fortement atténuée au cours la dernière année de ma thèse, je garde des souvenirs précieux de la gentillesse avec laquelle mes interventions pour présenter mes travaux ont toujours été reçues. L'intérêt que chacun m'a porté m'a fait chaud au cœur. Un grand merci en particulier à l'équipe RH qui a beaucoup fait afin de permettre que mon travail puisse être terminé dans les meilleures conditions possibles. Finalement merci à Marie Barbier, Romain Bigourdain, Ines Farah, Mélanie Nabucet, Clément Alteresco, Ruben Podadera et tous ceux que j'oublie, mais qui m'ont apporté leur aide et leur soutien.

Il me faut également remercier les personnes de l'EPF de Montpellier pour leur gentillesse et les échanges que j'ai pu avoir avec eux tout au long de cette période. Merci à François Stéphan de m'avoir donné l'occasion de participer à plusieurs reprises à la formation des étudiants-ingénieurs. En plus de Nicolas et Christophe, il me faut remercier chaleureusement Antoine Gademer et Ludmila Lopes (ainsi que leurs adorables Mei et Alma !). De précieux amis sans qui cette période aurait été bien plus triste et difficile, merci les copains !

Un grand merci également à l'équipe LUMEN de l'IM2NP, en particulier Hasan Alkhatib pour son aide précieuse et les mesures effectuées ensemble. Merci également à Marcel Pasquinelli et Jean-Jacques Simon pour leur chaleureux accueil.

Enfin, je souhaite remercier l'ensemble de mes amis et proches. Je souhaite notamment dédier ce travail à ma famille qui a toujours cru en mes capacités, plus que je n'y croyais moi-même, et qui n'a jamais douté de ma réussite. Mes parents, Monique et Denis Politi sont l'exemple de la ténacité et du courage qui m'a donné la possibilité d'arriver au bout de ce parcours, parfois difficile. En particulier, ma mère nous offre

aujourd'hui un incroyable exemple de force, de courage et de volonté qui ne peut que forcer le respect et inspirer à être au moins à moitié aussi fort qu'elle.

Je ne peux réellement remercier ma famille à la mesure de l'importance de ce que chacun de ces membres m'a offert, mais je peux garantir que cela ne fait que consolider mon amour pour eux. Cela inclut donc mes deux parents et mes deux sœurs, Fanny et Lucie.

Mais cela inclut également les autres membres de ma famille, moins directs, mais non des moindres. Il s'agit de Raphaël Navarre, Gertrud et Egon Fischer qui se sont montrés toujours bienveillants durant cette période et je les en remercie très chaleureusement ! Je voulais également inclure dans ces remerciements Anne-Marie et Alain Cavanier pour leur soutien durant mes études.

Et maintenant, le meilleur pour la fin. Celle dont le nom se doit être ajouté à ceux de mes encadrants et même de mon jury de thèse ! Celle dont l'examen est aussi précis que redoutable, la première juge de mon travail dont l'exigence n'a d'égal que son intelligence, son éthique et sa gentillesse, Nadine Fischer.

Nadine Fischer a été en première ligne durant plus de trois ans. Elle m'a encouragée, supportée et toujours rappelé de croire en ma capacité à réussir. Cela n'a pas toujours été facile, mais son esprit d'analyse et de synthèse ainsi que son tact à mon égard ont été une des clefs de ma réussite. Elle a également fait de son mieux pour me rendre la vie plus facile et agréable et je ne peux que l'en remercier. Toutes ces heures à m'écouter d'une oreille attentive et à me donner ses avis et conseils m'ont permis d'atteindre une qualité d'organisation, d'analyse et de synthèse très précieuse. En résumé, j'ai eu beaucoup de chance d'avoir pu traverser cette aventure avec cette jeune femme de talent à mes côtés. Je ferai de mon mieux pour lui rendre la pareille tout au long de sa thèse et de notre vie ensemble. Merci Nadine !

Encore une fois merci à celles et ceux que j'ai cités, mais également à toutes les autres personnes qui ne l'ont pas été et qui m'ont apporté leur soutien et leur aide. Pour terminer, merci aux personnes qui prendront le temps de lire ce manuscrit.

Bastien Politi,

le 10 juin 2021 à St. Ingbert – Rohrbach

Table des matières

Introduction . Systèmes communicants sans-fil autonomes en environnement de bureaux...	1
Chapitre 1 . Énergie ambiante en environnement de bureaux.....	6
1.1 Récupération de l'énergie ambiante en intérieur.....	7
1.2 Sources d'énergie et moyens de récupération	8
1.2.1 Énergie mécanique	9
1.2.2 Énergie thermique	14
1.2.3 Énergie des ondes radiofréquence	17
1.2.4 Énergie lumineuse	22
1.2.5 Récapitulatif	27
1.3 Énergie lumineuse récupérable en pratique dans des environnements intérieurs.....	29
1.3.1 Particularités de l'environnement lumineux en intérieur.....	31
1.3.2 Méthodes d'évaluation existantes.....	33
1.4 Conclusion du chapitre.....	36
Chapitre 2 . Méthode d'évaluation de l'énergie lumineuse récupérable en intérieur	38
2.1 Approche d'évaluation non standardisée	40
2.1.1 Modèle théorique.....	40
2.1.2 Modèle de calcul de l'énergie récupérable en intérieur	46
2.2 Validation du modèle en conditions réelles	52
2.2.1 Prototype de récupérateur d'énergie lumineuse.....	53
2.2.2 Ajustement du modèle de calcul.....	60
2.2.3 Expérimentation et confrontation des résultats.....	63
2.3 Conclusion du chapitre.....	67
Chapitre 3 . Développement d'un moyen d'analyse à faible coût	70
3.1 Développement d'un moyen d'analyse à bas coût	72
3.1.1 Composition du système d'analyse	73
3.1.2 Réalisation compacte du système d'analyse.....	75
3.1.3 Acquisition des observations	76
3.2 Classification des sources de lumière.....	78
3.2.1 Entraînement des classifieurs	82
3.2.2 Généralisation des classifieurs.....	96
3.2.3 Évaluation en environnement lumineux réel	98
3.2.4 Contraintes et limites des capteurs commerciaux.....	104
3.3 Conclusion du chapitre.....	105
Chapitre 4 . Evaluation de l'énergie récupérable par méthode de reconstruction spectrale	107
4.1 Méthode de reconstruction du spectre lumineux.....	108
4.2 Reconstruction de spectres en environnement contrôlé	110
4.3 Reconstruction de spectres en conditions réelles	114
4.3.1 Variations du spectre de la lumière naturelle.....	115
4.3.2 Amélioration du système d'analyse.....	117
4.3.3 Application finale de la méthode d'analyse.....	120

4.4 Conclusion du chapitre.....	125
Conclusion Générale.....	127
Perspectives	130
Références	133
Communications.....	139
Annexes	140
Table des Figures	141



Introduction

Systemes communicants
sans-fil autonomes en
environnement de bureaux.

Entre 20 et 30 milliards d'objets connectés seraient déjà reliés aux réseaux de communication mondiale [1] et le palier des 75 milliards pourrait être atteint à l'horizon 2025 [2]. Parmi ces objets, certains s'installent dans notre quotidien dans l'objectif d'améliorer notre confort ou bien optimiser certains processus pour les rendre plus performants ou économes [3]. Dans les bâtiments par exemple, ces objets connectés ont pour but de surveiller, contrôler et optimiser les usages, tels que la régulation thermique ou lumineuse [4]–[6]. C'est une démarche qui se généralise à l'échelle des villes avec les multiples projets de « Smart Cities » et qui fait la part belle à l'instrumentation, l'automatisation et l'optimisation des bâtiments pour en faire des « Smart Building ».



Figure 0.1 : La tablette Joan, communicante (Wifi), commercialisée par Visionect, permet d'afficher l'état de réservation de salle de réunion ou d'autres salles partagées. Équipée d'un écran à encre électronique, sa consommation de puissance électrique moyenne est de l'ordre d'une dizaine de milliwatts.

Dans cette démarche, le groupe *Bureaux A Partager* (BAP) qui aujourd'hui met en place une offre de « coworking » au travers de sa marque « *Morning*, », souhaite développer des moyens d'affichage (voir la Figure 0.1) pour ses usagers et cela dans l'ensemble des espaces communs des bureaux partagés : les salles de réunion et de conférences principalement. Les usagers de ces espaces pourront alors en connaître l'état de réservation, ce qui rendra leur utilisation plus fluide, plus efficace et ainsi optimiser les ressources des espaces de coworking. Cela répond à des enjeux sociaux économiques importants dans cette nouvelle économie du partage des locaux de bureaux.

Dans le processus de décision de l'installation de ce genre de systèmes, pour l'entreprise BAP les deux critères fondamentaux sont : la simplicité d'installation (pas de travaux

pour alimenter en énergie électrique ces systèmes) et l'absence de maintenance nécessaire¹ (ni changement ni rechargement des batteries par un opérateur) [7]. Pour répondre à ces deux critères, il est envisagé de récupérer l'énergie ambiante qui environne ces objets communicants.

Les objectifs de cette thèse sont l'étude des sources d'énergie disponibles dans l'environnement de ces systèmes d'affichage et l'évaluation de la quantité d'énergie qui peut en être récupérée pour les alimenter. Ce travail s'intéresse particulièrement aux moyens de récupération des énergies présentes en environnement de bureaux et leur adéquation avec le dispositif à alimenter.

Plusieurs critères guident cette étude. Le premier est la quantité d'énergie consommée par l'afficheur. Il s'agit de la quantité d'énergie cible, à récupérer de l'environnement, pour contrebalancer la consommation de l'afficheur et le rendre ainsi autonome énergétiquement. Le deuxième critère est celui de la taille ou l'encombrement du récupérateur. À partir de ces deux critères, il est alors possible de guider dans notre choix d'un moyen de récupération dont l'encombrement est faible et qui permette d'atteindre le niveau de génération d'énergie suffisant. Un troisième et dernier critère est celui à l'emplacement du système d'affichage et donc du lieu de récupération d'énergie. En effet, ces emplacements sont conditionnés par le système d'affichage qui doit être positionné au plus près de l'entrée de la pièce dont il affiche l'état de réservation. Le système de récupération doit donc être capable de récupérer l'énergie nécessaire à l'endroit qui lui est imposé.

Dans le cas du dispositif d'affichage qui est utilisé dans cette étude, la tablette Joan de Visonect, nous avons mesuré que celle-ci nécessite une puissance électrique sur une journée de plusieurs dizaines de milliwatts, dans un mode de fonctionnement normal par défaut. En lissant sa consommation énergétique sur une semaine de fonctionnement, elle consomme environ 250 mWh d'énergie par jour, ce qui correspond à une utilisation constante d'un peu plus de 10 mW de puissance électrique. En comparaison, les réseaux de capteurs ou objets communicants de faible puissance, qui utilisent aujourd'hui la récupération d'énergie environnante comme source d'alimentation, ne consomment en moyenne que quelques dizaines de μW ou moins [8]–[10]. Le défi de ce projet est donc

¹ Cela a également comme intérêt de limiter le plus possible les manipulations et les contacts avec les utilisateurs de ces systèmes, mais aussi avec les responsables de maintenances de ces services, ce qui en termes sanitaires est intéressant.

de taille : optimiser la récupération d'énergie dans le cas d'objets qui consomment 100 à 1000 fois plus que ceux rendus autonomes, présents dans la littérature, et cela alors que l'objet se situe dans un environnement de bureaux dans lequel les sources potentielles sont bien moindres qu'à l'extérieur ou que dans un environnement industriel.

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse se concentre donc sur les moyens de relever ce défi et vise à donner les méthodes et outils nécessaires pour aider à concevoir des systèmes de récupération d'énergie ambiante.

Cela se traduit dans le premier chapitre de ce manuscrit par une étude des moyens de récupération d'énergie existants, capables de fournir l'énergie nécessaire à ces objets connectés dans des environnements de bureaux. Ces moyens de récupérations existants dans la littérature ou disponibles commercialement, sont alors jugés sur leurs capacités à fournir de l'énergie dans l'environnement considéré, à partir des critères décrits précédemment. Cela permettra de discriminer, parmi ces différents moyens de conversion de l'énergie, lequel semble le plus favorable à notre application. La source d'énergie ambiante désignée comme la plus avantageuse dans un environnement de bureaux et pour l'alimentation d'un système tel que la tablette Joan est l'énergie lumineuse. À partir de cela, une étude plus approfondie est ensuite menée sur les méthodes existantes d'évaluation de l'énergie lumineuse récupérable environnement d'intérieur et des contraintes et limitations auxquelles elles sont confrontées. Ce chapitre se conclut sur le constat qu'aucune méthode d'analyse décrite dans la littérature ne permet de connaître précisément l'énergie qui peut être récupérée en pratique dans un environnement d'intérieur.

À la suite de ce premier chapitre, le Chapitre 2 propose une méthode capable de réaliser une telle évaluation. Cette méthode se démarque des approches présentées dans le Chapitre 1 par sa capacité à évaluer l'énergie récupérable dans un environnement lumineux réel. C'est une méthode qui, à l'inverse des modèles théoriques généralement utilisés, permet d'établir l'énergie récupérable en pratique, de manière précise. Ce chapitre décrit donc le modèle de calcul sur lequel repose cette méthode et présente les éléments nécessaires à son fonctionnement. Ensuite, un prototype de récupération est conçu de manière à valider expérimentalement le modèle en comparant ses calculs aux mesures du prototype. Les résultats de cette comparaison sont discutés ainsi que la

capacité qu'un récupérateur d'énergie lumineuse en intérieur pourrait avoir d'alimenter un système d'affichage tel que celui de BAP.

Le Chapitre 3 présente un moyen d'analyse de l'environnement lumineux à bas coût et à faible résolution. Le but de ce dispositif est de remplacer l'utilisation d'un spectromètre compact nécessaire à la méthode décrite dans le Chapitre 2 et dont le coût est généralement supérieur à 1000 €. Au stade de prototype, ce dispositif ne coûte que 40 € pour 5 photodiodes différentes, contre environ 3000 € pour le spectromètre équipé d'un capteur de 2048 pixels. Avec son faible volume de 36 cm³, contre les 256 cm³ du spectromètre, il a comme intérêt d'être 7 fois moins encombrant. Contrairement au spectromètre, ce dispositif a aussi l'avantage de ne pas nécessiter de recalibrations et d'être déployable sans ordinateur d'acquisition des données. Ce chapitre se concentre donc sur la description de ce moyen de mesure et sur la méthode qui y est associée pour reconnaître le type de source lumineuse présente dans l'environnement observé. Un ensemble de tests sont mis en place pour rendre cette méthode de reconnaissance du type de source lumineuse la plus efficace possible.

Enfin, le Chapitre 4 décrit l'étape finale permettant de remplacer l'utilisation du spectromètre pour le modèle de calcul. Cette étape consiste à reconstruire des spectres lumineux à partir des résultats obtenus dans le chapitre précédent. Il s'agit de démontrer qu'en reconstituant un spectre à partir des mesures prises par le dispositif à faible coût, il est possible d'obtenir des résultats de calculs de l'énergie récupérable équivalents en précisions à ceux du Chapitre 2. De même que pour le Chapitre 3, une série de différents tests sont menés de manière à montrer que cette méthode fonctionne et également à évaluer ces performances.

Finalement, la méthode développée tout au long de ces chapitres montre qu'il est possible de calculer de manière précise, l'énergie récupérable en pratique dans un environnement d'intérieur grâce à un système de mesure à faible coût et faible résolution. Cela donne finalement la possibilité de dimensionner des récupérateurs d'énergie adaptés aux besoins d'un appareil à rendre autonome et d'évaluer les emplacements de l'environnement les plus avantageux pour leur déploiement.

Chapitre 1

Énergie ambiante en environnement de bureaux

1.1 Récupération de l'énergie ambiante en intérieur	7
1.2 Sources d'énergie et moyens de récupération	8
1.2.1 Énergie mécanique.....	9
1.2.2 Énergie thermique.....	14
1.2.3 Énergie des ondes radiofréquence	17
1.2.4 Énergie lumineuse	22
1.2.5 Récapitulatif.....	27
1.3 Énergie lumineuse récupérable en pratique dans des environnements intérieurs.....	29
1.3.1 Particularités de l'environnement lumineux en intérieur	31
1.3.2 Méthodes d'évaluation existantes	33
1.4 Conclusion du chapitre.....	36

Ce chapitre présente tout d'abord les sources d'énergie existantes, telles que l'énergie mécanique (vibratoire), thermique, radiofréquence, ou lumineuse, comme des sources d'alimentation en énergie fiables. Les différentes sources d'énergie ambiantes listées sont ensuite mises en perspective pour déterminer leur potentiel dans un environnement de bureau. Cela permettra de déterminer lequel parmi ces moyens de récupération pourrait être le candidat le plus approprié dans le cadre de l'intégration d'objets en environnement de bureaux. Pour cet environnement et en accord avec les contraintes que nous impose le système d'affichage à rendre autonome, nous montrerons que le choix de la récupération lumineuse comme moyen de récupération d'énergie semble le plus adapté. Une étude bibliographique sur la récupération de l'énergie lumineuse en environnement de bureaux sera exposée pour donner une vue d'ensemble des approches employées dans la littérature pour évaluer la quantité d'énergie qui peut y être récupérée. Cela permettra de révéler les problématiques et les limitations auxquelles se confronte ce domaine de recherche et d'ouvrir sur la proposition d'une approche qui permette d'évaluer précisément la quantité d'énergie lumineuse récupérable, en pratique, dans ces environnements de bureaux.

1.1 Récupération de l'énergie ambiante en intérieur

Depuis le début des années 2000, une approche s'est développée dans le monde de la recherche, visant à rendre autonomes en énergie des appareils tels que des réseaux de capteurs. Cette recherche consiste à donner à ces appareils la capacité de collecter l'énergie « ambiante » de son environnement immédiat. La qualification d'une source comme étant « ambiante » suit deux critères bien établis dans la littérature.

- L'énergie collectée doit provenir d'une source ne pouvant être épuisée sur l'échelle de temps de son utilisation : elle se renouvelle continuellement, à l'inverse d'une batterie ou d'une pile. [11]
- La récolte d'énergie depuis cette source ne doit pas être perceptible par l'utilisateur. C'est-à-dire que l'énergie récupérée est captée de l'environnement ou de l'utilisateur sans que celui-ci le perçoive ou soit impacté par le processus de récupération. [12]

Ce domaine de recherche, appelé « Energy Harvesting » ou « Energy Scavenging », consiste à créer et développer des moyens récupération d'énergie qui puissent permettre à des appareils consommateurs d'être autonome en énergie ou, à minima, de prolonger leur durée de fonctionnement et limiter le plus possible leur maintenance. Plus précisément, dans ce courant de recherche, le « Harvesting » consiste à récupérer de l'énergie dans l'environnement ambiant, tandis que le « Scavenging » repose sur la récupération d'une énergie déjà utilisée pour un premier usage particulier et dont une certaine quantité, non utilisée, peut être récoltée [13]. Par exemple, dans le cas de récupération d'énergie lumineuse provenant du soleil, il s'agit de « Harvesting », tandis que la récupération de l'énergie lumineuse émise par une lampe correspond à du « Scavenging ». Le but reste cependant le même : récupérer et convertir de l'énergie de l'environnement ambiant pour la fournir, sous forme électrique, à des appareils communicants.

Les convertisseurs d'énergie les plus classiques sont ceux qui récupèrent :

- L'énergie mécanique,
- L'énergie thermique,
- L'énergie radiofréquence aussi appelée RF,
- L'énergie lumineuse.

Dans le cadre de cette thèse, on s'oriente uniquement vers de la récupération d'énergie ambiante en environnement d'intérieur et plus particulièrement aux environnements de bureaux.

1.2 Sources d'énergie et moyens de récupération

Cette section présente quelques exemples de prototypes de récupération d'énergie, d'expérimentations existantes dans la littérature ainsi que des dispositifs commerciaux actuellement disponibles à la vente. Ces convertisseurs d'énergie sont comparés à partir des critères de sélection, décrits plus tôt, afin de sélectionner la source d'énergie la plus favorable sur le plan de la densité de puissance, mais également de sa disponibilité (variations quotidiennes, saisonnières, etc.) pour notre application.

1.2.1 Énergie mécanique

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique repose sur différents principes physiques, principalement l'induction électromagnétique, et la piézoélectricité. Plus récemment se sont développés des prototypes basés sur des principes électrostatiques et triboélectriques. Pour quantifier l'énergie fournie par ces mouvements, il est couramment admis de l'exprimer en termes d'accélération, que ce soit en m/s^2 ou en g (la gravité terrestre, égale à une accélération de $9,81 m/s^2$).

a. Moyens existants de récupérations de l'énergie mécanique

Les convertisseurs à induction électromagnétique cherchent à faire varier dans le temps un champ magnétique à proximité d'une bobine. Cette variation de flux magnétique dans le temps induit aux bornes de la bobine une différence de potentiel. C'est le principe de la dynamo de vélo ou des génératrices industrielles repris et miniaturisé. C'est le cas du récupérateur ECO 200 [14] créé par l'entreprise EnOcean (Figure 1.1a), qui prend la forme d'un interrupteur conventionnel et consiste à récupérer l'énergie d'un utilisateur lorsque ce dernier l'actionne. Ce récupérateur consiste en un corps ferromagnétique mobile qui selon sa position touche un des pôles d'un aimant permanent. Lorsqu'une pression est exercée sur le bouton, le corps ferromagnétique se déplace et vient alors toucher le pôle opposé de l'aimant. Cette variation dans le temps du flux magnétique, perçu par la bobine de cuivre qui entoure le corps ferromagnétique, induit une différence de potentiel aux bornes de la bobine, et donc un courant électrique, si le circuit est fermé avec un système de récupération à condensateur ou batterie.

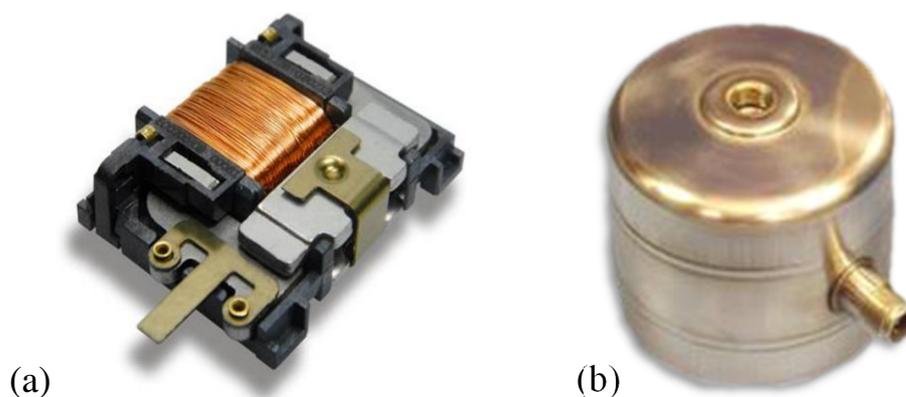


Figure 1.1 : Deux solutions commerciales de récupérateur d'énergie mécanique. (a) Récupérateur d'énergie mécanique EnOcean (interrupteur) (b) Récupérateur d'énergie vibratoire Perpetuum (>1000 €).

Dans le cas de ce dispositif de volume de 4 cm^3 , chaque appui sur l'interrupteur permet de récupérer une énergie d'environ $200 \mu\text{J}$.

D'autres dispositifs utilisant également le principe d'induction électromagnétique, développé par Perpetuum (Figure 1.1 b), sont commercialisés et permettent la récupération d'énergie vibratoire en milieu industriel. Ils sont notamment utilisés dans des applications de surveillance de procédés industriels ou en milieu ferroviaire pour la surveillance de l'état du matériel ou des transports pour leur maintenance. La capacité de production de ce type de récupérateur varie en fonction du modèle. En général, leur densité de puissance varie entre $10 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ à $500 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ pour des accélérations de $0,25 \text{ m/s}^2$ à $9,81 \text{ m/s}^2$.

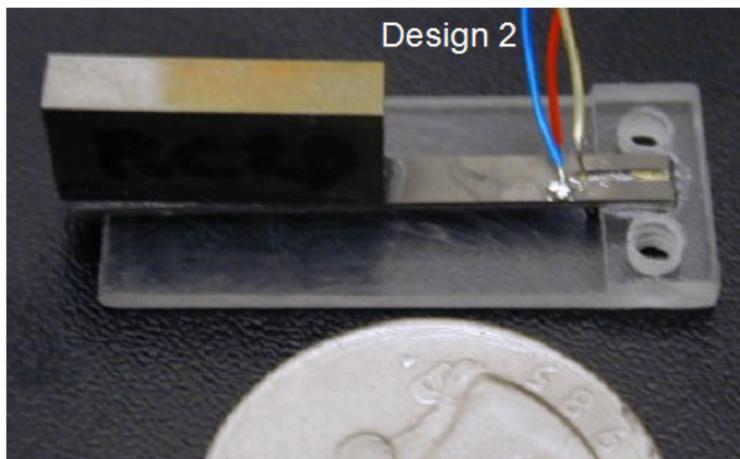


Figure 1.2 : Prototype de convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique utilisant l'effet piézoélectrique optimisée pour une fréquence de vibration de 120 Hz [15].

D'autres dispositifs commerciaux fonctionnent grâce à la transduction piézoélectrique. Les matériaux utilisés pour la création de transducteurs piézoélectriques sont des matériaux non conducteurs qui, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, ont la propriété de se polariser électriquement. Ce phénomène est appelé l'effet piézoélectrique direct, tandis que l'effet piézoélectrique inverse caractérise la capacité de ce même type de matériaux à se déformer mécaniquement à l'application d'un champ électrique. Les dispositifs qui appliquent cette méthode de récupération prennent souvent la forme de poutres suspendues vibrantes auxquelles sont couplés les transducteurs piézoélectriques. De cette manière, lorsque la poutre subit des déformations, celles-ci sont également appliquées au récupérateur qui se polarise en conséquence. À la différence des transducteurs électromagnétiques, ce type de récupérateur d'énergie est accordé à

une fréquence pour laquelle il pourra être performant. Il a pour avantage de pouvoir être configuré pour s'accorder à une large gamme de fréquences de récupération, mais pour des fréquences généralement plus importantes que celles auxquelles sont exposés les récupérateurs électromagnétiques.

Plusieurs prototypes présentés dans la littérature ont démontré la capacité des dispositifs piézoélectriques à convertir efficacement l'énergie vibratoire en énergie électrique. Un des premiers exemples est celui donné par Roundy et coll. en 2004 [15] avec un prototype de récupérateur piézoélectrique de seulement 1 cm^3 (voir Figure 1.2) qui récupère $375 \mu\text{W}$ lorsqu'il est exposé à une vibration de 120 Hz et dont l'accélération atteint $2,5 \text{ m/s}^2$.

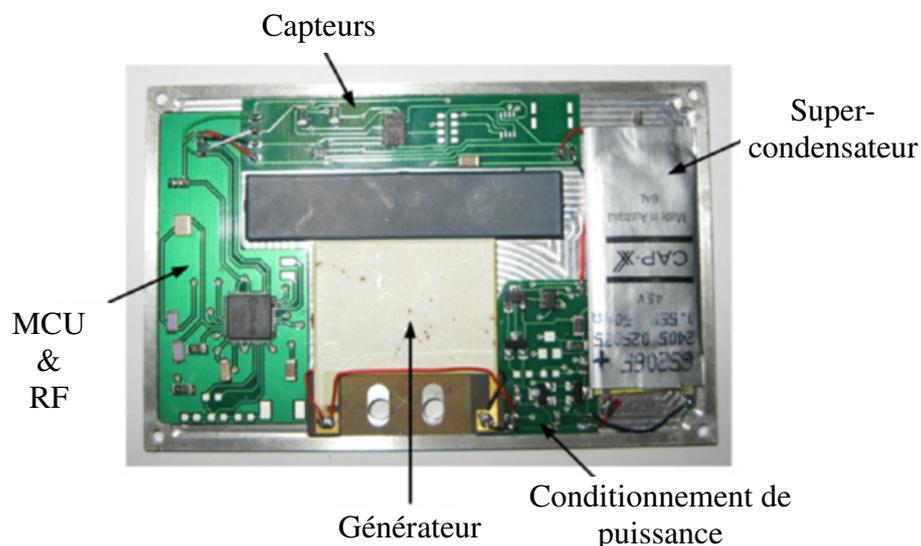


Figure 1.3 : Récupérateur d'énergie vibratoire développé par Zhu et coll. [16] de la dimension d'une carte de crédit.

Une autre démonstration d'un dispositif semblable réalisée en 2011 par Zhu et coll. [16], illustrée par la Figure 1.3, a montré que le récupérateur piézoélectrique présenté est capable de générer une puissance de $240 \mu\text{W}$ pour un volume d'environ 4 cm^3 . Cette densité de puissance de $60 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^3$ est atteinte dans l'enceinte d'un hélicoptère dont les vibrations ambiantes entraînent des accélérations de $3,9 \text{ m/s}^2$ pour une fréquence de 67 Hz.

Une configuration alternative à celle de la poutrelle suspendue, le diaphragme, a également démontré son aptitude à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique en obtenant des densités de puissance de $12 \text{ mW} \cdot \text{cm}^3$ pour une accélération de vibration de $9,81 \text{ m/s}^2$ et une fréquence de 113 Hz.

Au-delà des prototypes de laboratoires, les solutions commerciales de récupérateurs piézoélectriques, des fabricants tels que SmartMaterial [17] et PIEZO.COM [18] proposent des dispositifs de récupération piézoélectrique fonctionnant sur le modèle de la poutre suspendue (voir la Figure 1.4).

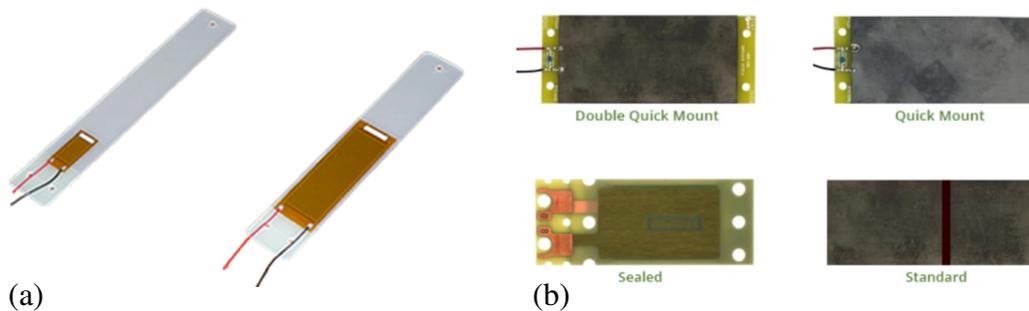


Figure 1.4 : (a) Dispositifs piézoélectriques vendus par SmartMaterial [17]. (b) Convertisseurs piézoélectriques vendus par PIEZO.COM [18].

Enfin, deux autres technologies de conversion électromécaniques se développent et démontrent d'intéressantes capacités à générer de l'énergie à partir de vibrations et autres excitations mécaniques. Ces technologies sont des prototypes qui reposent sur les propriétés électrostatiques ou triboélectriques de certains matériaux. Chen et coll. ont montré que le prototype triboélectrique qu'ils ont fabriqué permet de générer une densité de puissance maximale de $72,6 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ sous une accélération de vibration de $200 \text{ mm}/\text{s}^2$. Leur expérimentation a également permis de démontrer la capacité de leur création à récupérer l'énergie provenant des vibrations d'un moteur thermique, mais également les vibrations générées par les pas d'une personne et des vibrations exercées sur une table de bureau [19]. Pour des récupérateurs électrostatiques, Khan et Quadir répertorient que ce type de technologie atteint une densité de puissance d'environ $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ lorsqu'elle est soumise à de fortes accélérations ($2,5 \text{ g}$, soit environ $25 \text{ m}/\text{s}^2$) et une densité maximale de $175 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour des accélérations de vibration inférieures à une gravité (1 g soit $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$) [20]. Au-delà des performances que ces deux types de récupérateurs (électrostatiques et triboélectriques) affichent dans la littérature, ils restent pour le moment des prototypes de laboratoires et à la différence des dispositifs thermoélectriques et piézoélectriques, ils ne se trouvent pas encore de distributeur pour commercialiser des solutions de ce type.

b. Énergie mécanique ambiante en environnement de bureaux

En ce qui concerne les sources mécaniques d'énergie, elles ne sont pas soumises à la réglementation, à l'exception des vibrations acoustiques [21]. L'émission d'énergie mécanique, vibratoire dans un environnement de bureaux reste cependant faible en intensité et dépend principalement de son taux d'occupation [22].

Donc, malgré le potentiel de génération important que peuvent atteindre certains moyens de récupération d'énergie mécanique, ceux-ci n'y parviennent qu'en étant à proximité immédiate de sources de vibrations importantes (voiture, train, outillage industriel, etc.) qui les soumettent à des accélérations considérables. Dans le cas d'environnement de bureaux, les vibrations disponibles sont sensiblement plus faibles en intensité et généralement erratiques (passage de personnes à proximité du récupérateur par exemple).

Des recherches telles que celles menées par Chen et coll. [19] ont montré qu'il est possible de récupérer l'énergie ambiante en intérieur. À l'aide d'un récupérateur triboélectrique, il a été démontré qu'il est possible de récupérer l'énergie ambiante émise par des chocs sur une table de bureaux, mais également par les pas de personnes dans une pièce. Cependant, cette dernière application, qui semble prometteuse, produit une énergie seulement suffisante pour des mesures, par exemple pour localiser des sources de vibrations dans l'espace.

L'énergie mécanique récupérable dans un environnement de bureaux pourrait provenir d'appareils tels que des ordinateurs qui sont très répandus dans ce genre d'espace [23]. Cependant, récupérer l'énergie vibratoire générée par ces appareils conditionne fortement l'emplacement de la récupération et n'est donc pas souhaitable dans notre cas. De plus pour de faibles niveaux de vibrations, les dimensions nécessaires pour atteindre les niveaux de puissance nécessaire à notre système d'affichage seraient importantes.

En ce qui concerne les systèmes de récupération de l'énergie du corps humain, ceux-ci ne peuvent pas être retenus comme source d'énergie « ambiante » et ne conviennent pas à notre application. De même, un dispositif qui nécessite l'action des utilisateurs (de manière consciente), qu'il soit électromagnétique comme l'ECO200 par exemple, piézoélectrique ou d'une autre technologie ne peut pas rentrer dans cette catégorie.

La récupération de l'énergie produite par l'utilisateur lors de son interaction avec la tablette d'affichage (qui a des fonctionnalités tactiles) a été prise en considération au départ de ce projet comme source d'énergie potentielle. Après quelques semaines d'observations du comportement des utilisateurs vis-à-vis de cette tablette, cette perspective a rapidement été mise de côté. La conclusion de ce test était que les utilisateurs n'interagissent que très peu avec les tablettes et se contentent de lire ce qu'elles affichent.

Pour résumer, l'énergie mécanique ne semble pas être un candidat prometteur pour notre cas d'étude. Bien que ce moyen puisse permettre de récupérer des niveaux d'énergie importants, les conditions requises pour cela ne semblent pas réunies dans un environnement de bureaux.

1.2.2 Énergie thermique

La récupération de l'énergie thermique peut être réalisée de deux manières différentes. D'une part avec des convertisseurs thermoélectriques qui récupèrent l'énergie thermique contenue dans les gradients de température. D'autre part avec des convertisseurs pyroélectriques qui récupèrent l'énergie contenue dans les variations de température.

a. Moyens existants de récupérations de l'énergie thermique

Le premier type de convertisseur d'énergie thermique en énergie électrique repose sur l'effet Seebeck, découvert depuis près de 200 ans par Thomas Johann Seebeck. C'est une source d'énergie bien connue et dont les applications en récupération d'énergie ambiante ont démontré leur capacité à produire d'importantes densités de puissance. Dans des conditions de fonctionnement où l'évacuation de la chaleur est forcée, des puissances supérieures à 100 W sont possibles [24].

Cependant, l'encombrement de l'équipement nécessaire au refroidissement fait considérablement chuter la valeur de densité de puissance [25]. De même pour une démonstration faite par Lu et Yang en 2010 avec une puissance générée de 150 mW à l'aide de huit dispositifs thermoélectriques placés sur un radiateur en intérieur, la nécessité d'y associer deux volumineux dissipateurs de chaleurs [26]. Des démonstrateurs ont cependant prouvé qu'il est possible de réaliser des conservations

de l'énergie thermique en électricité à partir de faible gradient de température en étant placé sur le corps humain.

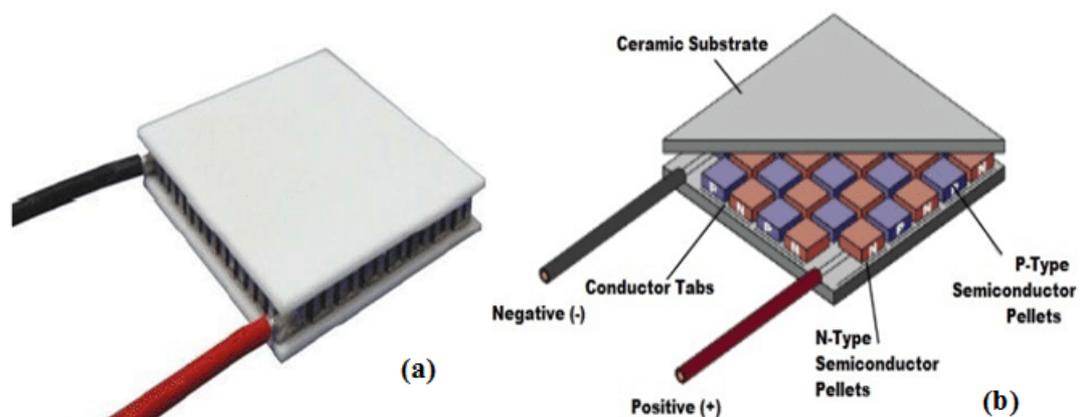


Figure 1.5 : (a) Générateur thermoélectrique typique commercialisé, (b) Vue éclatée d'un système thermoélectrique.

Publiés récemment, les résultats des expérimentations menées par Nozariasbmarz et coll. [27] montrent que $35 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ de densité de puissance peuvent être convertis depuis le poignet d'un humain (voir Figure 1.6). Ce résultat est obtenu avec un gradient de température de seulement $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ en régime établi. Cependant, les convertisseurs d'énergie qui fonctionnent sur le principe de la récupération de l'énergie du corps humain ne peuvent pas être considérés comme des sources d'énergie ambiante. Elles ne sont donc pas prises en compte comme candidate potentielle pour notre projet.

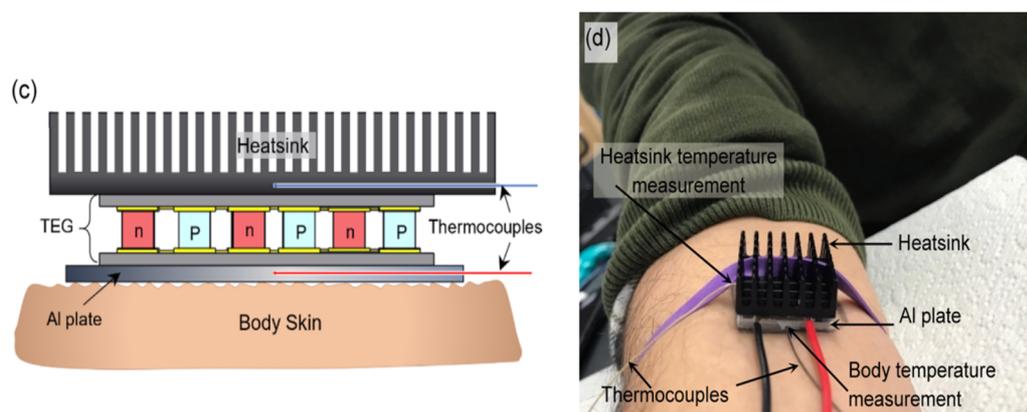


Figure 1.6 : Dispositif thermoélectrique utilisé par Nozariasbmarz et coll. [27] pour récupérer l'énergie à partir d'un faible gradient de température entre le corps humain et l'air ambiant.

De récents travaux publiés par Cottrill et coll. [28] montrent qu'une utilisation alternative de dispositif thermoélectrique, associé à un résonateur thermique développé dans leur étude (voir Figure 1.7), est capable de générer $20 \mu\text{W}/\text{cm}^3$. Ces

résultats sont obtenus à partir des variations quotidiennes de températures en extérieur avec 10 °C d'amplitude, centrées autour de 25 °C.

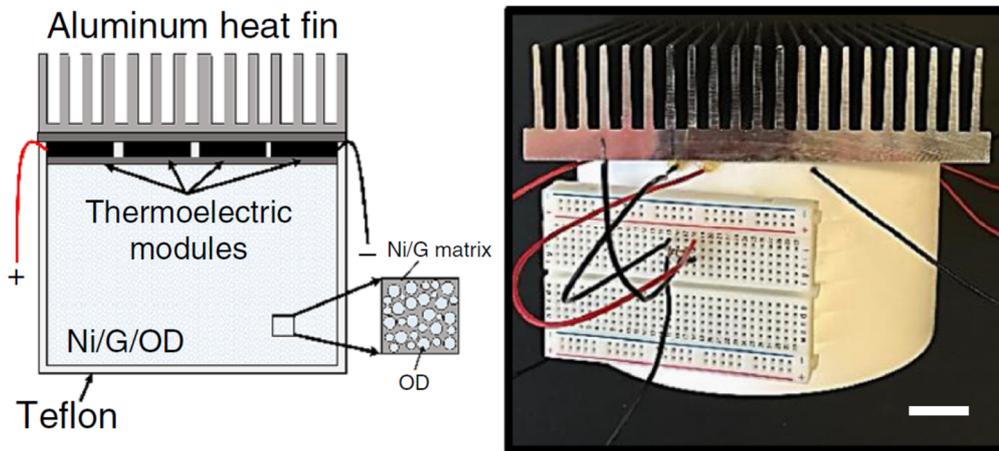


Figure 1.7 : Système de Cottrill et coll. permettant de récupérer l'énergie des variations à basse fréquence (mHz) de l'environnement [28].

La seconde approche développée dans le cadre de la conversion de l'énergie thermique est l'utilisation de convertisseurs pyroélectriques. Contrairement aux convertisseurs thermoélectriques, qui nécessite un gradient de température entre ses deux surfaces doit être constant, les convertisseurs pyroélectriques nécessitent des variations de température afin de réaliser une conversion efficace. L'avantage de ce type de dispositif est que son efficacité est plus importante pouvant atteindre théoriquement 50 % [25].

Commercialement, les générateurs thermoélectriques sont connus et développés depuis plus d'un siècle et sont commercialisés par de nombreuses entreprises (TECTEG, KRYOTHERM, etc.). À l'inverse, comme l'expliquent Thakre et coll. [20] les systèmes pyroélectriques connaissent un développement récent en ce qui concerne leur application pour la récupération d'énergie, leur cœur applicatif étant majoritairement la mesure de température. Par conséquent, aucune solution industrielle n'est commercialisée pour le moment.

b. Énergie thermique ambiante en environnement de bureaux

Dans des espaces de bureaux, les sources d'énergie ambiantes sont par exemple les gradients de température présents entre l'air ambiant et les surfaces des machines présentes ou les fenêtres des locaux. Les plus importants que l'on peut mentionner

sont les radiateurs et les fenêtres. En pratique, une puissance importante de 150 mW peut en être extraite en utilisant des générateurs thermoélectriques [26].

Néanmoins, les dissipateurs nécessaires pour atteindre ce niveau de puissance sont très volumineux et les sources de gradient de température se situent à des endroits très particuliers et contraignent fortement l'emplacement du récupérateur. De plus ces gradients de température ne sont pas garantis tout au long de l'année. Par exemple, des radiateurs ne fonctionnent que sur des périodes spécifiques de l'année. Cependant, sans gradient de température suffisamment important, la génération d'énergie de ce type de récupérateur se voit radicalement impactée.

Les conditions requises pour atteindre ces niveaux de générations paraissent finalement difficiles à atteindre dans un environnement de bureau sans avoir à contraindre l'emplacement du récupérateur d'énergie ou que celui-ci nécessite d'être volumineux.

En résumé, malgré un potentiel de génération d'énergie important, l'utilisation de convertisseur de l'énergie thermique en énergie électrique n'apparaît pas adéquate à notre application. Autant d'un point de vue de l'encombrement d'un tel système de récupération, des contraintes d'emplacements de récupération et disponibilité de l'énergie, cette source d'énergie ne répond pas à nos critères de choix.

1.2.3 Énergie des ondes radiofréquence

Une autre source d'énergie étudiée dans le cadre de la récupération d'énergie pour alimenter diverses applications à faible consommation est celle des ondes électromagnétiques servant aux télécommunications. Que ce soient les routeurs permettant l'accès sans-fil à internet ou encore les bornes relais essentielles au maintien des réseaux GSM, 3G, 4G ou 5G de nos téléphones portables, la densification des transmissions radiofréquences porte à considérer cet ensemble de signaux comme un réservoir d'énergie pour les objets connectés. L'avantage de ce type de source d'énergie est qu'à la différence de sources de lumière, de vibrations ou de gradients thermiques, elle est présente tout au long du jour et de la nuit. Une grande variété d'ondes radiofréquences existe, tout comme les protocoles de communication qui y sont associés.

a. Moyens existants de récupérations de l'énergie RF

Les méthodes de récupération de ces ondes ne sont donc pas tous les mêmes selon les fréquences et les protocoles de communication qu'elles utilisent. Les différents types d'ondes RF sont généralement classés en deux catégories de sources : les sources dites « dédiées » et les sources « ambiantes » [29]. Les premières sont des dispositifs optimisés dans l'unique but d'émettre de l'énergie radiofréquence stable et prévisible afin d'alimenter un dispositif également optimisé pour récupérer efficacement l'énergie émise. Ce principe est particulièrement utilisé dans les applications d'identification par radiofréquence (RFID), mais uniquement sur de faibles distances. Une entreprise américaine, PowerCast [30], commercialise des solutions d'alimentation qui fonctionnent sur ce principe (voir la Figure 1.8). Un émetteur relié au réseau électrique émet un signal RF sur une fréquence allant de 850 MHz à 2,4 GHz selon les modèles. À partir de cette émission, des dispositifs de récupération (rectennas) peuvent servir à convertir cette énergie transmise sans fil en énergie électrique utilisable. Cependant, ce type de solution ne correspond pas à nos critères de sélection, car il ne s'agit pas de récupération d'énergie ambiante, mais de transfert d'énergie sans fil.



Figure 1.8 : Système de transmission d'énergie sans fil vendu par PowerCast. À gauche : l'émetteur d'ondes radiofréquence avec son bloc d'alimentation. À droite : différents récupérateurs d'énergie RF émise par l'émetteur.

La seconde catégorie de sources d'énergie RF compte deux sous-catégories de sources ambiantes. La première sous-catégorie que sont les sources « ambiantes statiques » (ou prédictibles), se compose de transmetteurs rayonnant un signal RF prédictible et non optimisé (en ce qui concerne la fréquence et la puissance

transmise). Les stations de relais pour les réseaux mobiles, la radio et la télévision sont des exemples de sources ambiantes prévisibles. Finalement, les dernières sources d'énergie RF sont du type « ambiante dynamique » qui regroupe les transmetteurs émettant de manière périodique et incontrôlée par le système de récupération. La récupération depuis ce type de source nécessite l'utilisation d'un système de récupération capable d'assurer la surveillance des canaux de transmission pour détecter les moments opportuns de récupération d'énergie. Les points d'accès Wifi font partie de cette catégorie de sources [29].

La récupération de l'énergie radiofréquence fonctionne sur le même principe que son émission. Il est nécessaire d'utiliser des antennes optimisées pour capter certaines bandes de fréquences, plus ou moins larges.

De récents travaux sur la conception de récupérateur d'énergie ont démontré des niveaux de puissance récupérable à l'aide d'antennes optimisées de l'ordre de $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ [31], [32]. Ils précisent que cette méthode de récupération permet un niveau satisfaisant d'énergie récupérée seulement en étant proche d'une source de manière à avoir un champ électromagnétique localement suffisant ou en ayant une surface importante de récupération.

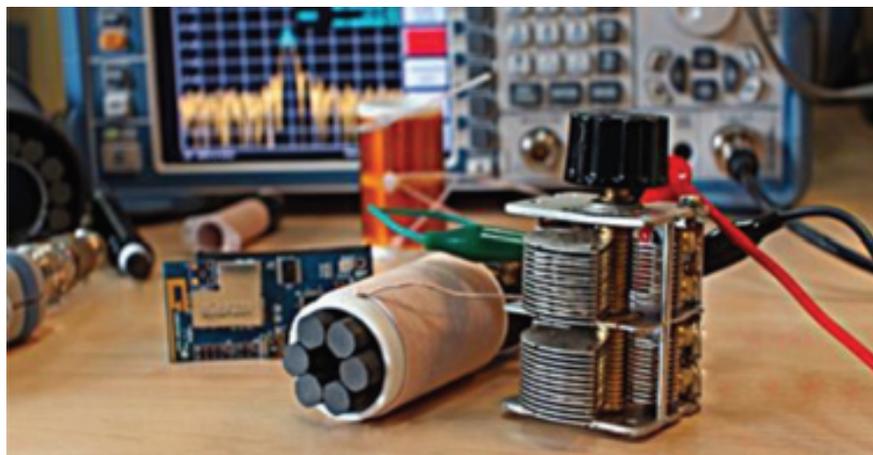


Figure 1.9 : Exemple de récupérateur d'énergie radiofréquence pour réseau de capteurs. Celui-ci a permis la récupération de $240 \mu\text{W}$ à une distance de 22,5 km d'un émetteur de 150 kW rayonnant en onde moyenne (MW) à 900 kHz [33].

Cette faible densité de puissance par unité de surface ou de volume s'explique par les dimensions devant parfois être importantes (voir la Figure 1.9), autant pour les antennes que pour l'électronique nécessaire au conditionnement du signal pour son utilisation. La Figure 1.9 donne un bon exemple du type de récupérateur pouvant

fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation d'un capteur. Mais ses dimensions rendent difficile son intégration de même que le niveau de génération atteint est conditionné par la présence d'une antenne de transmission de forte puissance. Or, cette classe d'antenne tend à se raréfier. Pour des fréquences plus répandues comme le wifi dont la fréquence est généralement 2.45 GHz, la compacité des antennes de récupération est bien plus importante. Cependant, les niveaux d'émission des émetteurs sont rarement de plus de 100 mW et diminuent avec l'amélioration des technologies et des protocoles de communication.

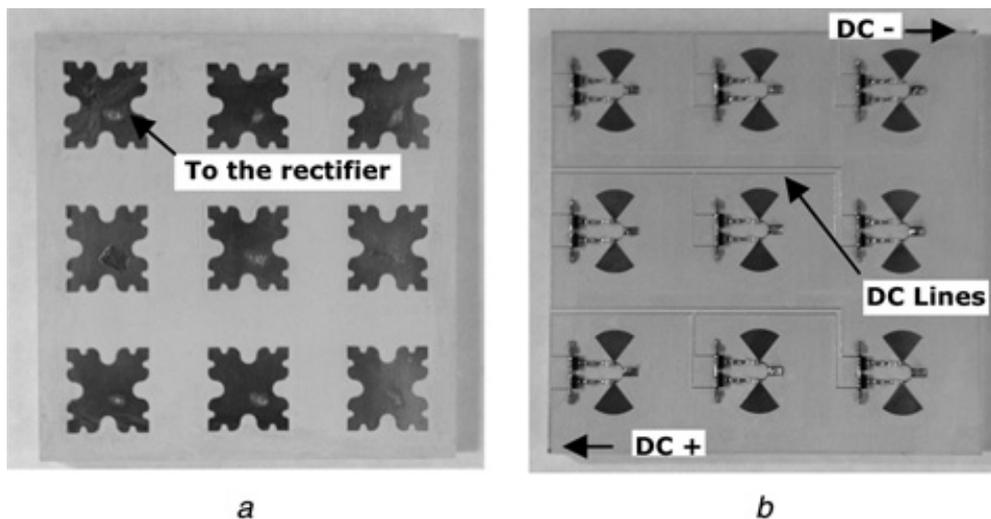


Figure 1.10 : Design d'un récupérateur d'énergie à partir d'onde Wifi (2.45 GHz). (a) Géométrie proposée pour l'antenne. (b) Design du redresseur associé à l'antenne. (Source : Olgun et coll., 2012)

L'énergie finalement disponible à la récupération est souvent de l'ordre de quelques milliwatts ou même des quelques microwatts. Dans ces conditions, les récupérateurs parviennent uniquement à récupérer une très faible densité de puissance ($\sim 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) comme présentée dans les travaux d'Olgun et coll. [34]. Des résultats expérimentaux ont tout de même démontré que l'efficacité de récupération de l'énergie d'onde de 2,45 GHz peut atteindre 82 % et permettre des densités de puissance importantes ($1,3 \text{ mW}/\text{cm}^2$). Ces résultats sont cependant restreints à des tests de laboratoire, dans une chambre anéchoïque avec un émetteur de 22 dBm (160 mW) placé à 20 cm de distance de l'antenne récupératrice [35]. Cette faible densité de puissance atteignable en conditions normales et non pas de laboratoire est l'un des obstacles majeurs à la popularisation de ce genre de méthode de récupération [36].

b. Énergie RF ambiante en environnement de bureaux

Pour les émissions d'ondes radiofréquence, les valeurs limites fixées en Europe sont établies dans les recommandations européennes du 12 juillet 1999 (1999/519/CE) sur lesquelles se base la France au travers du décret n° 2002-775. Par exemple, pour les émissions wifi, les limites de puissance d'émission (puissance isotrope rayonnée équivalente ou PIRE) sont de 100 mW (20 dBm) pour les fréquences autour de 2,45 GHz et de 200 mW (23 dBm) à 1 W (30 dBm) pour les fréquences autour de 5 GHz [37]. De plus, l'intensité de ces signaux diminue considérablement avec l'augmentation de la distance entre le point de récupération du signal et la source. En pratique, comme le récapitule le travail de Chiaramello et coll. [38], les limites fixées par ces normes et réglementations sont très loin d'être atteintes. Les valeurs maximums d'exposition en environnement de bureaux arrivent à 4 % des limites de 28 V/m établies dans les recommandations de l'ICNIRP (Commission internationale sur la protection contre les radiations non ionisantes) [39]. En moyenne, des niveaux de rayonnement inférieur à 1 % de ces limites sont observés d'après l'ensemble des résultats réunis. De plus, la répartition de l'énergie radiofréquence n'est pas spatialement uniforme et se concentre évidemment près de leurs sources.

Comme le montre Zhang et coll. [40] dans la présentation de leur récupérateur hybride (récupération d'énergie lumineuse et RF), la récupération d'une densité de puissance allant jusqu'à $1,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ est possible pour une puissance de signal RF de -10 dBm ($100 \mu\text{W}$). Étant donné que ce niveau de puissance de rayonnement est rarement atteint dans des milieux bureaux, il est clair qu'une telle densité de puissance récupérée ne peut être récupérée qu'à proximité de la source de rayonnement comme Figure 1.11 l'illustre.

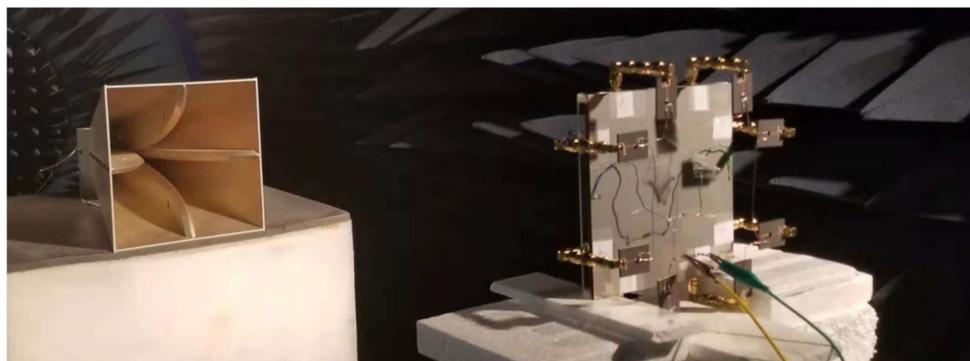


Figure 1.11 : Récupérateur d'énergie hybride (lumière/RF) exposé à un rayonnement RF ($100 \mu\text{W}$) [40]

En ce qui concerne la réelle récupération d'énergie ambiante, malgré l'omniprésence dans un bâtiment de bureaux de ce type d'énergie, sa densité par unité de surface est donc généralement insuffisante. Pour l'alimentation d'un dispositif communicant devant être autonome en énergie et qui consomme plusieurs milliwatts, il serait nécessaire d'employer d'importantes surfaces de récupération. C'est alors l'encombrement du système qui devient un frein à son utilisation.

Cette source d'énergie peut donc être un moyen de transport d'énergie sur de relatives courtes distances avec l'utilisation d'un émetteur dédié, avec l'exemple de PowerCast pour alimenter des systèmes comme l'afficheur de BPA. Mais ce principe de transmission d'énergie s'écarte alors des sources pouvant être qualifiées de sources « ambiantes » et ne correspond donc pas à ce que nous recherchons.

1.2.4 Énergie lumineuse

La dernière source d'énergie à étudier est une source très présente dans les environnements de bureaux. Celle-ci peut prendre différentes formes : la lumière du jour émise par le soleil ou bien lumière artificielle rayonnée par des lampes. Les moyens de récupération et leur technologie sont à l'image des sources qui émettent ce type d'énergie, variées.

a. Moyens existants de récupérations de l'énergie lumineuse

Différentes technologies permettent la récupération de l'énergie lumineuse. La technologie dominante sur le marché des cellules photovoltaïques est celle des cellules en silicium [7]. Cette technologie se divise en trois catégories : les cellules en silicium monocristallin, polycristallin, qui forme la première génération de cellules photovoltaïques et les cellules en silicium amorphe qui font partie des cellules de deuxième génération.



Figure 1.12 : Module PV fabriqué par le groupe IXYS constitué de 4 cellules photovoltaïques en silicium monocristallin montées en série (dimensions : 43 mm x 14 mm ; surface : 6 cm²)

Parmi les cellules solaires en silicium, celles en silicium monocristallin ont pour avantage d'avoir les meilleures performances sous soleil direct. La cellule affichée dans la Figure 1.12 atteint par exemple 25 % d'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en conditions standard de test AM 1.5G [41]. Mais cette technologie, bien que plus performante, est plus coûteuse que le silicium polycristallin. Ce type de cellule offre des prix très bas grâce au fort développement de ces dernières années. Son prix a chuté en dessous du seuil symbolique de \$1/W en 2012 en qui aujourd'hui est autour de \$0.22/W [42].

De son côté, le silicium amorphe souffre de moins bonnes performances sous soleil direct du fait de sa structure non cristalline. Mais les cellules PV qui utilisent ce matériau ont l'avantage d'être plus simples à fabriquer et moins coûteuses à produire [41]. Cette technologie a également la particularité d'avoir une chute de performance avec la diminution du niveau d'intensité lumineuse qui est moins importante que celle subie par cellules en silicium mono ou polycristallin [43].

D'autres technologies comme celle en silicium amorphe, appartenant à la seconde génération, aussi appelées « cellules à couches minces », sont commercialisées, mais dans une moindre mesure. Pour certaines, cela vient du fait qu'elles ne sont pas aussi concurrentielles que les cellules en silicium (ratio coûts/performances) dans le cas des cellules CIGS. Pour d'autres, cela est dû aux restrictions liées à leur toxicité comme c'est le cas du cadmium pour les cellules en CdTe. Enfin, les cellules à base d'arséniure de gallium (GaAs) sont particulièrement utilisées dans le cadre de la récupération d'énergie solaire pour des applications aérospatiales pour lesquelles les hautes performances sont prioritaires face au coût de fabrication.

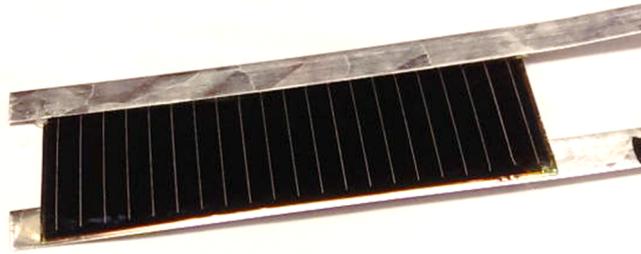


Figure 1.13 : Cellule PV de type couche mince de 2^e génération en arséniure de gallium (GaAs) fabriquée par l'entreprise AltaDevices. Ce type de cellule à la particularité de pouvoir être flexible selon le procédé de fabrication ou le substrat employé.

Cependant, grâce à de nouvelles techniques de fabrication, le fabricant AltaDevices a développé des cellules en GaAs à plus faibles coûts (voir la Figure 1.13) qui détiennent aujourd'hui le record de performance de récupération sous le soleil pour des cellules à monojonction avec 29,1 % de rendement sous $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ de spectre AM1.5G [44]. Elles ont également démontré qu'elles peuvent atteindre des rendements de 20 % de conversion en intérieur sous éclairage artificiel [45].

Depuis quelques années, l'essor d'une troisième génération de convertisseurs d'énergie lumineuse en énergie électrique donne de nouvelles perspectives pour la récupération de l'énergie lumineuse de faible intensité. Des technologies telles que les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques (OPV) et les cellules à pigments photosensibles (Dye Cell PV), ou encore les cellules à pérovskites, se révèlent prometteuses, avec des densités de puissance supérieures à $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ sous environ $150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ d'énergie rayonnée dans l'environnement (500 lux de lumière émise par une LED) [46], [47].



Figure 1.14 : Modules à base de cellules pérovskite stable, performante et ayant une surface de $24,97 \text{ cm}^2$ fabriquée par Jung et coll. [48].

Ces technologies plus récentes promettent d'atteindre bientôt un niveau de maturité suffisant en ce qui concerne leur stabilité dans le temps et l'augmentation de leurs

dimensions [48], comme l'exemple du module (au format carré de 5 cm de côté) à base de cellules pérovskite au format carré de 5 cm de côté présenté dans la Figure 1.14.

Pour ce qui est de leur commercialisation, ces cellules de troisième génération restent encore marginales sur le marché et les technologies prometteuses présentées précédemment en reste encore à des échantillons de laboratoire.

La possibilité d'alimenter des capteurs communicants, ou autres applications à faible consommation d'énergie, grâce au rayonnement solaire et à l'utilisation de cellules solaires, a été démontrée à de nombreuses reprises (voir la Figure 1.15). Par exemple le projet Prometheus de Jiang et coll. [49] (Figure 1.15a) permet la récupération de 192 mW pour une surface de 30 cm² (6,3 mW/cm²). Celui de Corke et coll. [50] arrive à atteindre des pics de 8,2 mW/cm² de récupération d'énergie avec une moyenne mensuelle allant de 80 à 400 kJ, équivalant à une génération moyenne de puissance (nuit comprise) de 0,3 à 1,55 mW/cm². HydroWatch développé par Taneja et coll. [51] obtient une densité de puissance de 7,8 mW/cm² avec une énergie journalière récoltée allant de 100 à 1700 mWh dans un environnement urbain, ce qui correspond à en puissance moyenne générée de 0,12 à 2 mW/cm². Heliomote créé par Raghunathan et coll. [52] (Figure 1.15 b), a aussi démontré la possibilité d'obtenir des capteurs communicants pouvant atteindre l'autonomie énergétique grâce à la récupération d'environ 5 mW/cm² d'énergie solaire.

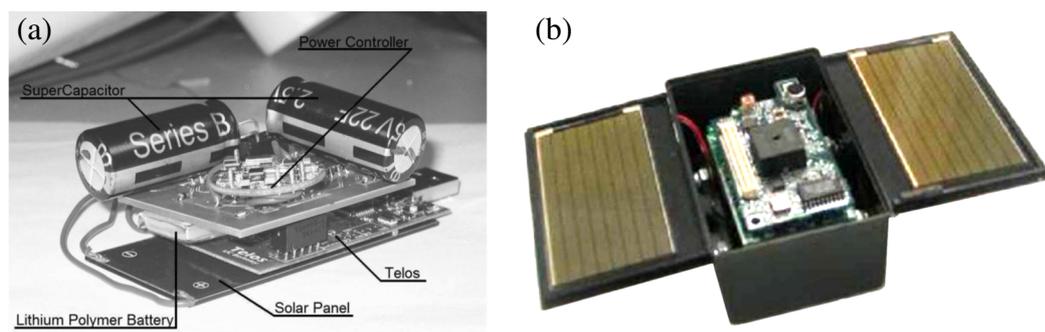


Figure 1.15 : Exemples de systèmes fonctionnant grâce à la récupération d'énergie solaire (a) Projet Prometheus de Jiang et coll. [49] (b) Heliomote de Raghunathan et coll. [52] (c) et (d) Projet Ambimax qui récupère aussi l'énergie éolienne à l'aide d'une turbine [53].

Au-delà de l'énergie rayonnée par le soleil, directement récupérée en extérieur, la récupération d'énergie lumineuse peut également se faire en intérieur, via des sources artificielles ou naturelles à travers des parois vitrées. Dans ce cas, les ordres de grandeur de densité de puissance sont bien moins importants qu'en extérieur. Ce

domaine d'application de la récupération lumineuse pour alimentation de capteurs ou objet connecté s'appelle l'indoor PV. Les grands défis de ce domaine sont de travailler en général à faible intensité lumineuse (moins de 1000 lux), avec des rayonnements divers et variés. [54]. Dans les environnements de bureaux, il est considéré que la densité de puissance lumineuse disponible varie autour de 100 à 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ [11], [31], [55]. En 2007, Hande et coll. [56] démontrent comme Wang et coll. en 2010 [4] qu'il est possible d'alimenter des capteurs équipés de communication sans fil pour transmettre leurs données. Depuis, différents travaux ont produit des résultats comparables et montré que l'utilisation de cellules ou modules en silicium amorphe pour les récupérateurs d'énergie permet d'obtenir une densité de puissance de 10-20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dans un environnement d'intérieur dont le spectre lumineux est celui des lampes fluorescentes [8], [57]. Des chercheurs se sont également intéressés à la récupération avec d'autres types de cellules et ont démontré que les cellules en GaAs ou à base de pigments photosensibles permettent de rendre autonomes des capteurs communicants [58]. De plus, il a été démontré que contrairement à une exposition au rayonnement solaire dans des conditions lumineuses d'intérieur typiques, des cellules PV telles que les cellules organiques présentent des performances supérieures à celles de cellules en silicium [59].

b. Énergie lumineuse ambiante en environnement de bureaux

Bien qu'en environnement de bureaux le niveau d'énergie récupérable soit très inférieur à celui présent en extérieur, cette source d'énergie ambiante semble permettre sa récupération dans des conditions satisfaisantes pour notre projet d'affichage autonome en énergie. Premièrement cette énergie est omniprésente dans tous locaux où ont lieu des activités humaines. Sa présence est d'ailleurs sujette à une réglementation. Celle-ci exige que certains minima en matière des niveaux d'intensité lumineuse soient respectés afin d'assurer le bien-être des personnes présentes au sein de ces bâtiments (norme française : NF EN 12464-1, norme internationale ISO 8995/CIE 8008). La norme NF EN 12464-1 établit un minimum de 100 lux pour les zones de circulations et couloirs et entre 200 et 500 lux pour les différentes zones de bureaux.

Ces minima d'intensité lumineuse sont donc un avantage dans un environnement où les sources autres d'énergie ambiante sont peu présentes ou réglementées pour ne pas atteindre des niveaux trop important (bruit, émission RF).

Malgré son caractère intermittent (cycle journée/nuit, présence de personne), la lumière est relativement bien distribuée, même si les zones proches de sources de lumière naturelle (fenêtres par exemple) profitent d'une quantité d'énergie pouvant être beaucoup plus importante selon l'orientation de la pièce et la saison.

1.2.5 Récapitulatif

En conclusion de l'étude sur les moyens existants de récupération d'énergie dans le contexte des environnements d'intérieur, il ressort de cela que l'énergie lumineuse est la plus favorable. Il est d'ailleurs intéressant de noter que dans les recherches qui présentent des récupérateurs d'énergie hybrides, la récupération de l'énergie lumineuse est un dénominateur commun.

Par exemple Tan et Panda ont présenté un système récupérant l'énergie thermique ainsi que l'énergie lumineuse [60]. Les résultats de leur expérimentation donnent une densité de puissance 12 à 30 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ pour des gradients de température respectifs de 5 à 10 °C et 11 à 29 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour une intensité lumineuse variant de 380 à 1010 lux (sous éclairage fluorescent). Toujours dans l'idée de faire de la récupération hybride, Yu et coll. ont proposé la récupération de l'énergie vibratoire et l'énergie lumineuse [61]. Les performances atteintes avec leur récupérateur varient entre 3 et 12 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ dans une gamme de 160 à 530 lux d'intensité lumineuse et 50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour une accélération de vibration de 5 m/s² à une fréquence d'environ 234 Hz. Un exemple plus récent a été présenté par Zhang et coll. en 2019 et fait la démonstration d'un de ces dispositifs de récupération d'énergie hybride lumineux/RF. La capacité de récupération de ce système est de 7.45 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ sous 360 lux et 1.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ avec une exposition à -10 dBm de puissance rayonnée à une fréquence de 2,45 GHz [40], des résultats supérieurs à des travaux antérieurs similaires auxquels ils se comparent.

Il faut noter que l'énergie lumineuse récupérée dans ces exemples représente une proportion importante de l'énergie récupérer si ce n'est pas la majorité. Il est possible de remarquer que les conditions de récupération d'énergie qui sont décrites dans ces expérimentations représentent des conditions d'environnement lumineux relativement

standard, tandis que les conditions requises pour les autres sources d'énergie sont plus rarement atteintes.

Il semble en effet que cette source d'énergie peut être considérée comme une alliée fiable, malgré son caractère intermittent, pour une récupération optimale d'énergie dans des environnements d'intérieur.

Source d'Énergie ambiante	Densité de Puissance Récupérable	Critères d'Adéquation au Projet	
Mécanique	12 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	<input checked="" type="checkbox"/> Densité <input type="checkbox"/> Disponibilité	<input checked="" type="checkbox"/> Encombrement <input type="checkbox"/> Positionnement
Thermique	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	<input checked="" type="checkbox"/> Densité <input type="checkbox"/> Disponibilité	<input type="checkbox"/> Encombrement <input type="checkbox"/> Positionnement
Radiofréquence	1,5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	<input type="checkbox"/> Densité <input checked="" type="checkbox"/> Disponibilité	<input type="checkbox"/> Encombrement <input checked="" type="checkbox"/> Positionnement
Lumière	10-50 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	<input checked="" type="checkbox"/> Densité <input checked="" type="checkbox"/> Disponibilité	<input checked="" type="checkbox"/> Encombrement <input checked="" type="checkbox"/> Positionnement

Tableau 1.1 : Densités de puissance évoquées dans la littérature ainsi que les avantages et inconvénients de la récupération de chacune de ces sources.

Afin de conclure cette partie de notre étude des sources d'énergie existantes pour la récupération d'énergie dans des bureaux, un récapitulatif est proposé dans le Tableau 1.1.

Ce tableau récapitule les densités de puissance atteignables pour les différentes sources d'énergie ambiante présente dans cet environnement et souligne leur adéquation aux attentes du projet.

Finalement, en observant les études et recherches menées dans le domaine de la récupération d'énergie en intérieur, il ressort de cela que la récupération d'énergie lumineuse est généralement l'énergie offrant un maximum de densité de puissance malgré ses contraintes de période de récupération. Cette source d'énergie est considérée comme étant la plus présente de manière générale en comparaison des autres sources. Elle a également l'avantage d'avoir à disposition des technologies matures pour sa récupération [4]. De plus, depuis quelques années, des technologies de récupérateurs photovoltaïques se développent de manière à être beaucoup plus performantes sous les rayonnements lumineux d'intérieurs [62], [63].

Pour une application qui permet l'utilisation d'un dispositif de stockage de l'énergie (batterie, condensateur ou supercondensateur) et combler ainsi les périodes de fonctionnement sans lumière, la récupération de l'énergie lumineuse apparaît comme la plus favorable ce qui est le cas dans notre cas.

Il n'en reste pas moins nécessaire d'établir qu'elles sont les contraintes que celle-ci impose. Certains aspects de la récupération lumineuse en intérieur posent aujourd'hui encore des contraintes à la communauté scientifique et aux ingénieurs qui cherchent à cerner le plus précisément possibles l'énergie que l'on peut en récupérer.

Les sous-sections suivantes s'intéressent à l'environnement lumineux d'intérieur et la manière dont ses spécificités peuvent compliquer l'évaluation de cette énergie récupérable. Le but est d'arriver à établir précisément le niveau d'énergie récupérable dans l'environnement de déploiement d'un dispositif d'affichage de BAP. En y parvenant, il serait alors possible de développer un système de récupération qui corresponde au mieux aux besoins de l'appareil, selon son emplacement.

Pour cela, les différentes méthodes et approches présentées dans la littérature pour évaluer l'énergie récupérable dans un environnement d'intérieur sont étudiées pour définir quels sont leurs avantages et leurs limites.

1.3 Énergie lumineuse récupérable en pratique dans des environnements intérieurs

La section précédente démontre, à partir de la littérature, que l'on peut considérer les sources de lumière comme étant la source d'énergie la plus favorable à la récupération d'énergie dans des environnements de bureaux. Son importante densité de puissance et sa distribution généralisée dans ce type d'environnement la rendent effectivement attractive comme méthode de recyclage d'énergie ambiante.

Néanmoins, certains aspects de cette technique de récupération peuvent limiter notre capacité à évaluer correctement le niveau d'énergie récupérable qu'elle peut atteindre et finalement que l'on peut en attendre dans un environnement intérieur.

Par exemple, contrairement à la récupération solaire en extérieur pour laquelle un standard international est établi, le domaine de la récupération d'énergie en intérieur souffre du manque d'un équivalent. En effet sur la base d'observations et d'études de l'énergie solaire disponible, le spectre standard « Air Mass 1.5 Global » (AM1.5G), a été établi. Celui-ci équivaut à un rayonnement solaire global d'une valeur d'irradiance de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, théoriquement disponible sur terre après être passé au travers d'une masse atmosphérique et demie. Bien que cette valeur soit très générale et ne soit donc pas parfaitement représentative du rayonnement solaire [64], c'est un standard couramment utilisé par les chercheurs et les fabricants de convertisseurs PV. Il permet en effet d'avoir une idée globale des performances qui peuvent être attendues des convertisseurs en extérieur et de les comparer.

Pour la récupération en environnement d'intérieur, établir un standard semblable paraît utile ou même nécessaire, mais beaucoup plus difficile à réaliser. Bien que le nombre de technologies de convertisseurs à comparer soit sensiblement le même que celui pour la récupération en extérieur, les sources de lumière ne sont pas uniques. Certains fabricants prennent le parti de donner les performances de leurs produits sous des types d'éclairages artificiels particuliers pour des intensités lumineuses particulières, mais cela ne donne qu'un aperçu réduit de la gamme d'intensités auxquelles elles seront confrontées en réalité. De plus, que ce soient des sources de lumière naturelle ou artificielle, la composition spectrale de l'environnement peut être extrêmement variée et évoluer. Par exemple, de nouvelles technologies d'éclairage artificielles comme les LED remplacent progressivement les anciennes, telles que lampes à incandescence ou halogènes. Cela représente un changement considérable de spectre et donc un impact sur les performances de conversion de cellules photovoltaïques. Sans compter que la lumière naturelle, qui représente une part significative de l'énergie lumineuse disponible en environnement de bureaux, voit son spectre lumineux modifié une fois passé à travers la vitre d'une fenêtre.

Dans ces conditions, établir d'un spectre standardisé en intensité ou en composition, similaire à celui créé dans le cadre de la récupération solaire en extérieur semble difficile. Il faut donc envisager d'autres manières d'évaluation de l'énergie récupérable par un convertisseur PV dans un environnement de bureaux.

Les sous-sections suivantes décrivent en détail les contraintes que les particularités de l'environnement lumineux d'intérieur induisent pour l'évaluation de l'énergie récupérable. Ensuite les différentes méthodes d'évaluation développées dans la littérature, ainsi que leurs limites seront présentées.

1.3.1 Particularités de l'environnement lumineux en intérieur

De manière générale, les particularités évidentes de l'énergie lumineuse dans des bureaux que l'on peut lister sont les suivantes :

- Une intensité lumineuse variable dans le temps et à différentes échelles (quotidienne et saisonnière)
- Des sources de lumière inégales dans leur composition spectrale, mais aussi dans leur intensité selon les lieux, leur accès à la lumière naturelle et leur orientation.
- Le niveau de récupération variable en fonction de l'emplacement et de l'orientation du dispositif de récupération au sein d'une même pièce.

Ces particularités sont d'ordre général, elles s'appliquent de manière équivalente aux récupérateurs d'énergie lumineuse, quels que soient la technologie ou les matériaux qui les constituent.

Pour aller plus loin et comme cela a été expliqué précédemment, les sources de lumière présentent dans l'environnement lumineux d'espaces de bureaux peuvent être des sources artificielles ou naturelles. Par conséquent, les spectres lumineux auxquels les convertisseurs PV sont soumis peuvent varier considérablement en intensité comme en composition. Ces différences en composition spectrale sont d'autant plus critiques que les niveaux d'éclairage requis dans des environnements de bureaux sont établis en lux. Cette unité de mesure semi-empirique établie par la norme internationale ISO 8995/CIE 8008 repose sur la sensibilité de l'œil humain aux rayonnements électromagnétiques. De ce fait, un rayonnement tel que ceux des sources de lumières artificielles modernes, dont la quasi-intégralité du rayonnement est émise dans le spectre visible, peut atteindre un niveau de lux similaire à celui d'une source naturelle, comme le soleil, en émettant cependant beaucoup moins d'énergie.

En résumé, en considérant deux sources de lumière, l'une artificielle et l'autre une source de lumière naturelle telle que le Soleil, si ces deux sources de lumière rayonnent une quantité égale d'énergie, du fait de la concentration de son rayonnement dans la gamme du visible, la source artificielle atteint un niveau d'éclairage en lux plus important que celui d'une source de lumière telle que le Soleil.

Cela s'explique par le fait que le spectre d'une source de lumière comme les LEDs concentre ses rayonnements dans la gamme de lumière visible par l'œil humain. De leur côté, le rayonnement solaire ou celui de lampes incandescentes ou halogènes s'étalent en partie au-delà de cette gamme visible du spectre lumineux, dans les ultraviolets et les infrarouges. La Figure 1.16 représente un spectre de lumière naturelle (soleil indirect passant à travers une vitre) et deux autres spectres de sources artificielles (LED et lampes fluorescentes compactes).

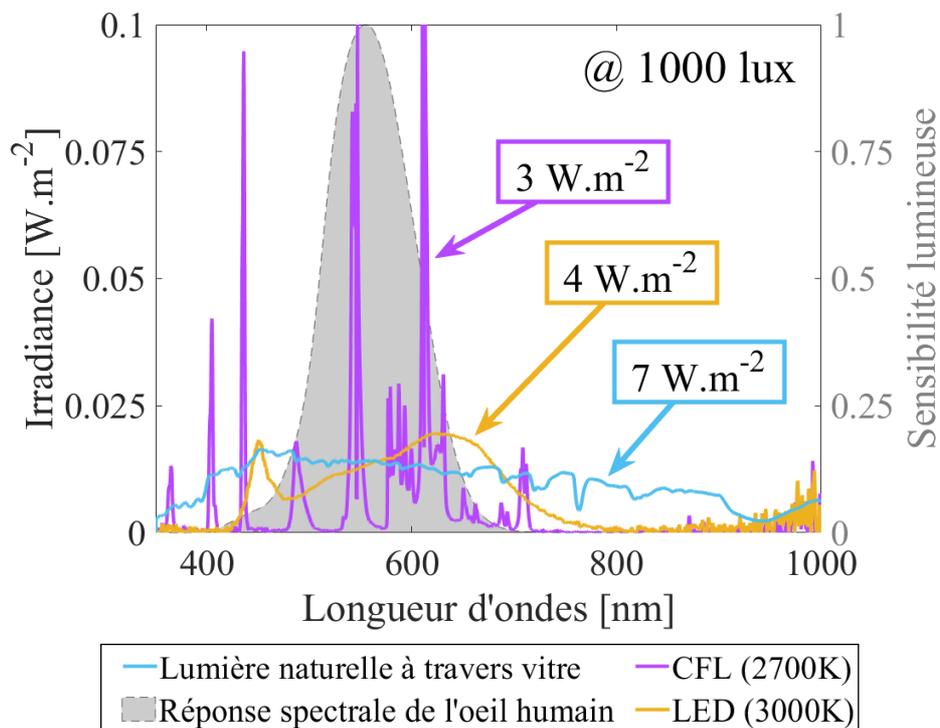


Figure 1.16 : Comparaison du spectre d'irradiance de 3 sources de lumière différentes pour le même niveau d'intensité lumineuse ressentie par l'œil humain.

Tous ces spectres ont été ajustés de telle sorte que leurs niveaux d'éclairage soient égaux. On constate sur la Figure 1.16 que la lumière naturelle du soleil filtrée par la vitre émet plus d'énergie qu'une lampe à LED ou qu'une lampe fluorescente compacte (CFL) pour atteindre le même niveau d'intensité lumineuse perçue par l'œil humain.

Cette différence montre clairement la nécessité de prendre en compte ses différences pour pouvoir récupérer efficacement l'énergie de cet environnement.

Un exemple concret permet de percevoir ce que cette différence implique en termes de récupération d'énergie. Pour des spectres tels que ceux des lampes fluorescentes (en tubes ou compactes) ou bien des lampes à LEDs, les maximums théoriques de conversion photovoltaïque, avec une cellule idéale, ont été calculés et avoisinent 50 % à 60 % [65], [66]. En comparaison, cette limite théorique est 30 % pour le spectre solaire et encore inférieur pour les sources de lumière incandescente et halogène. Il faut également noter que pour atteindre ces limites théoriques, les cellules idéales devraient être composées d'un matériau à la caractéristique de bande interdite adaptée au type de source lumineuse. En résumé, selon les technologies de convertisseurs d'énergie utilisée et le type de source à laquelle ils sont exposés, les performances peuvent considérablement changer pour une même intensité lumineuse observée.

Il est donc essentiel de prendre en compte les caractéristiques spectrales de l'environnement lumineux ainsi que les caractéristiques d'absorption du convertisseur d'énergie lumineuse utilisé, cela afin ne pas risquer d'obtenir d'importantes erreurs d'évaluation de l'énergie récupérable.

La sous-section suivante s'intéresse aux moyens existants d'évaluation de l'énergie lumineuse récupérable. Elle décrit les limites de ces méthodes d'évaluations face à des environnements de bureaux dont la composition lumineuse peut changer considérablement et où les convertisseurs d'énergie lumineuse peuvent avoir des performances variables. Enfin, la dernière sous-section présente les contraintes secondaires, mais non négligeables, de l'intégration système qui est à prendre en compte pour avoir une connaissance la plus fine possible de l'énergie récupérable en pratique.

1.3.2 Méthodes d'évaluation existantes

Le début des années 2000 a vu apparaître un intérêt des chercheurs pour l'étude de la récupération d'énergie lumineuse en environnement d'intérieur [67]. Ces premiers travaux ont démontré la nécessité de développer des moyens de connaître les performances de cellule solaire sous faible intensité lumineuse. Les principaux problèmes soulevés sont que les cellules ne se comportent pas de la même manière

dans un environnement d'intérieur de faible luminosité que sous rayonnement standard AM1.5G et que leur rendement dépend du spectre lumineux qu'elles absorbent.

L'approche présentée a été d'établir des modèles empiriques qui puissent décrire le comportement des convertisseurs PV dans ce type d'environnement. Cette approche s'est par la suite développée jusqu'à obtenir des modèles équivalents des cellules performants également pour de faibles intensités lumineuses [68].

D'autres études ont présenté une approche différente pour tenter de répondre à cette problématique. Par exemple, des simulations permettant de recréer un environnement réel et ainsi d'évaluer l'énergie disponible avec une différence de 10 % avec la réalité [69].

Une autre approche utilisée consiste à réaliser des observations localisées de l'environnement lumineux. Plus lourde, mais plus précise, cette méthode nécessite d'étudier l'environnement de déploiement de l'objet à rendre autonome. De cette manière, il est possible de connaître précisément l'énergie disponible dans celui-ci et ainsi d'avoir la possibilité d'établir l'énergie récupérable dans cette situation particulière [70].

D'autres recherches, notamment celles qui visent à développer des cellules adaptées à ces environnements, ont choisi d'établir les niveaux de performances des cellules développées en les exposant à un éclairage d'intensité réduite, notamment composé de lumière artificielle (lampes halogènes, lampes fluorescentes ou LED) [62], [71]–[73]. Ces travaux établissent ainsi les performances des convertisseurs d'énergie lumineuse en fonction de plusieurs niveaux d'éclairement lumineux (de 200 à 1000 lux en général). De cette manière, il est possible de comparer les performances de différentes cellules, mais souvent sous un type de source lumineuse particulier.

Cependant, le niveau de performances des cellules solaires diffère selon la technologie de cellules PV utilisée et varie également en fonction du spectre lumineux auquel elles sont exposées. Plusieurs études ont été menées dans le but de déterminer le niveau de performances en intérieur des différentes technologies de cellules photovoltaïques de manière à déterminer laquelle parmi elles serait la plus performante sous éclairages artificiels [9], [46], [69], [72], [74]–[79].

Une limite commune à ces recherches est qu'elles se focalisent principalement sur les performances sous éclairages artificiels. Bien entendu, dans des espaces de bureaux, les sources de lumière artificielle sont toujours présentes. Mais selon le type de pièce étudiée, la lumière naturelle peut être une source très importante de lumière au cours de la journée et donc d'énergie [69]. Il est alors important de ne pas exclure la lumière naturelle de l'étude de l'énergie disponible en intérieur.

Cette lumière naturelle se caractérise d'ailleurs par sa différence avec la lumière naturelle en extérieur. En effet, le rayonnement naturel, en arrivant à l'intérieur de bâtiments, peut par des phénomènes de réflexion ou d'absorption se voir réduit sur certaines bandes de longueurs d'onde. Par exemple, en traversant une vitre, le spectre lumineux se verra atténué dans la gamme des infrarouges. À l'instar des sources de lumière artificielle qui, selon leur type ou même leur fabricant, présentent une grande gamme de différences relativement importante, la lumière naturelle en intérieur peut être sujette à un grand nombre de variations. Que ce soit la météo l'environnement intérieur ou extérieur (peinture des murs, etc.) ou même le type de vitre qu'elle traverse, son spectre peut varier considérablement. Le spectre lumineux auquel peuvent être exposés les récupérateurs d'énergie lumineuse dans cet environnement dont les sources de lumière peuvent être naturelles ou artificielles doit être étudié avec attention.

Un autre caractère limitant, commun aux approches présentées ci-dessus qui se basent sur des mesures de performances expérimentales ou sur de la modélisation, est qu'elles s'intéressent principalement à la puissance maximum que le type de cellule étudié est capable d'atteindre.

Cependant, d'un point de vue pratique, le point de production maximum de puissance d'une cellule dans un environnement donné ne représente pas exactement la puissance récupérable réellement utilisable. En effet, d'autres éléments doivent être pris en compte, notamment l'efficacité du système de récupération d'énergie pour : l'extraction de l'énergie produite par la cellule, le conditionnement de celle-ci, son stockage et son approvisionnement au système consommateur. Ces aspects « système » sont un point clé de la démarche de création d'un système de récupération. De la même manière que connaître le niveau de consommation de l'objet à rendre

autonome est crucial, ne pas avoir de détail sur les performances du récupérateur d'énergie dans son intégralité peut mener à une importante imprécision dans sa conception.

D'autres chercheurs se sont tout de même interrogés sur la capacité d'un système de récupération d'énergie lumineuse à alimenter des réseaux de capteurs et autres objets communicants. Ils montrent que ce type de dispositifs est tout à fait capable d'alimenter des appareils, dont la consommation de puissance très faible ($< 100 \mu\text{W}$) [80].

Cependant ces recherches ne permettent pas non plus d'établir le niveau d'énergie récupérable qui peut être attendu dans un environnement d'intérieur. Elles se limitent à optimiser la consommation de l'appareil consommateur pour que celle-ci puisse être compensée par le récupérateur d'énergie.

Le fait de prendre en considération la composition de l'environnement lumineux et les performances des convertisseurs photovoltaïques dans celui-ci semble une méthode prometteuse afin de prévoir l'énergie récupérable dans le lieu de déploiement futur d'un objet connecté. De cette manière, le dimensionnement du récupérateur d'énergie pour cet appareil peut être optimisé pour limiter son encombrement et son coût tout en assurant son alimentation en énergie afin de le rendre autonome et avec des besoins de maintenance limités.

1.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, les différentes sources d'énergie ambiante disponibles dans des environnements de bureaux ainsi que les moyens de récupération avec lesquels cette énergie peut être exploitée ont été passés en revue. La récupération de l'énergie lumineuse est finalement choisie comme source d'énergie la plus favorable au regard des performances de récupération atteintes dans la littérature. Elle est également considérée comme la source dont les moyens de récupérations correspondent le mieux aux contraintes imposées par le dispositif d'affichage de BAP.

Dans le but de connaître plus précisément l'énergie lumineuse récupérable en environnement de bureaux, différentes méthodes d'évaluation de l'énergie lumineuse

recupérable, qui existent dans la littérature, ont été présentées. Les spécificités de l'environnement lumineux d'intérieur ont été décrites. Celles-ci ont permis de démontrer que les méthodes d'évaluation existantes, qui évaluent principalement l'énergie récupérable depuis des monosources de lumière, ne peuvent pas donner des résultats précis en environnements réels. Afin de connaître l'énergie récupérable en pratique, dans l'environnement de fonctionnement d'un appareil consommateur à rendre autonome, une nouvelle méthode d'évaluation semble donc nécessaire.

Le chapitre suivant propose une telle méthode. Ce chapitre décrit donc comment il est possible d'obtenir une évaluation fidèle de l'énergie récupérable dans un environnement de bureaux à l'aide de cellules photovoltaïques. Pour cela, cette méthode prend le parti d'une approche modélisatrice, combiné à une approche expérimentale dans l'objectif de rendre le modèle le plus proche possible d'un système de récupération complet et réel.

En permettant de mieux connaître l'énergie récupérable dans un environnement, cette méthode donne la possibilité de dimensionner un récupérateur d'énergie capable de rendre énergétiquement autonome un appareil mis en place dans cet environnement.

Chapitre 2

Méthode d'évaluation de l'énergie lumineuse récupérable en intérieur

2.1 Approche d'évaluation non standardisée.....	40
2.1.1 Modèle théorique.....	40
2.1.2 Modèle de calcul de l'énergie récupérable en intérieur.....	46
2.2 Validation du modèle en conditions réelles.....	52
2.2.1 Prototype de récupérateur d'énergie lumineuse.....	53
2.2.2 Ajustement du modèle de calcul.....	60
2.2.3 Expérimentation et confrontation des résultats.....	63
2.3 Conclusion du chapitre.....	67

Pour tenter de répondre au besoin d'une méthode d'évaluation de l'énergie récupérable en pratique dans les environnements lumineux d'intérieur, mis en évidence dans le Chapitre 1, ce chapitre propose une méthode complète. Cette méthode cherche à réunir l'approche théorique à l'approche expérimentale en ajoutant les caractéristiques de la chaîne de récupération d'énergie à la modélisation du comportement des cellules photovoltaïques.

Ce chapitre décrit en détail un modèle qui se base sur les caractéristiques électriques et optiques de convertisseurs photovoltaïques et sur les mesures de la composition spectrale de l'environnement lumineux étudié. Au travers de la présentation de cette méthode, le chapitre vise à démontrer qu'une approche non standardisée de l'étude de l'environnement lumineux réel peut être le moyen d'évaluer la quantité d'énergie lumineuse récupérable en pratique.

La première section de ce chapitre détaille le modèle utilisé pour les calculs d'énergie récupérable. Elle décrit également les éléments nécessaires aux calculs de ce modèle, tout comme les méthodes de mesures utilisées pour les obtenir. Ces éléments sont : la caractéristique courant-tension d'une cellule PV, sa réponse spectrale et enfin, le spectre lumineux de l'environnement de récupération de l'énergie. Des démonstrations préalables de l'utilisation du modèle avec ces mesures sont présentées dans la sous-section. Ces tests démontrent les performances du modèle dans un environnement lumineux contrôlé.

La deuxième section s'intéresse à la validation du modèle de calcul en environnement réel et donc non contrôlé. Ces tests sous environnement lumineux réels sont réalisés de manière à confronter le modèle avec des mesures de récupérations en pratique. Le but de cette comparaison est d'établir le niveau de performance du modèle dans un environnement réel de récupération. Pour cela un prototype de récupérateur est conçu et fabriqué afin d'étudier cette récupération d'énergie en pratique grâce au système de mesure qu'il embarque. Les éléments qui le composent, ainsi que son fonctionnement, sont décrits dans la sous-section 2.2.1 L'expérimentation qui permet de faire l'acquisition des données nécessaires au modèle et l'acquisition des données de récupération du prototype est également présentée. Cette section se termine sur la confrontation des résultats une fois que le modèle a réalisé ses calculs et que les données du prototype ont été récupérées.

La dernière section conclut ce chapitre sur les résultats de l'expérimentation et les avantages et limites du modèle.

2.1 Approche d'évaluation non standardisée

La sous-section suivante aborde tout d'abord un modèle fondamental développé par Shockley et Queisser dans les années 1960 et couramment utilisé pour déterminer les performances de cellules photovoltaïques idéales. Celui-ci établit les bases du modèle décrit ensuite et qui a pour but de simuler le comportement d'une cellule photovoltaïque réelle. Enfin, les sous-sections suivantes présentent la manière dont les caractéristiques de la chaîne de récupération d'énergie sont ajoutées au modèle. Cet ajout a pour but de rapprocher les résultats de calculs du modèle des résultats de récupération d'un système réel.

2.1.1 Modèle théorique

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont été menées pour comparer les performances de différentes technologies PV sous des sources uniques de lumière artificielle en environnement contrôlé [77], [81]–[86]. Pour comparer ces différentes technologies, il existe une approche intéressante qui consiste à appliquer le modèle développé par Shockley et Queisser (modèle SQ) [87]. Ce modèle donne le rendement de conversion maximal théorique pour une cellule semi-conductrice à jonction unique idéale, quelle que soit la bande interdite théorique :

$$\eta^{SQ}(E_g) = \frac{V_{OC}^{SQ} J_{SC}^{SQ} FF^{SQ}}{P_{in}}, \quad (2.1)$$

avec P_{in} la puissance incidente dépendante de la composition spectrale, et les autres paramètres sont ceux que l'on retrouve dans la caractéristique, illustrée dans la Figure 2.1, du courant de la cellule en fonction de la tension. Ces caractéristiques sont : la tension de circuit ouvert idéale V_{OC}^{SQ} du convertisseur PV, la densité de courant de court-circuit J_{SC}^{SQ} idéale et FF^{SQ} le facteur de remplissage idéal. Ce facteur se calcule à partir de la valeur maximale de puissance, P_{max}^{SQ} que peut générer la jonction en la divisant par sa puissance idéale $P_{idéal}^{SQ}$ qui correspond au produit de V_{OC}^{SQ} et I_{SC}^{SQ} .

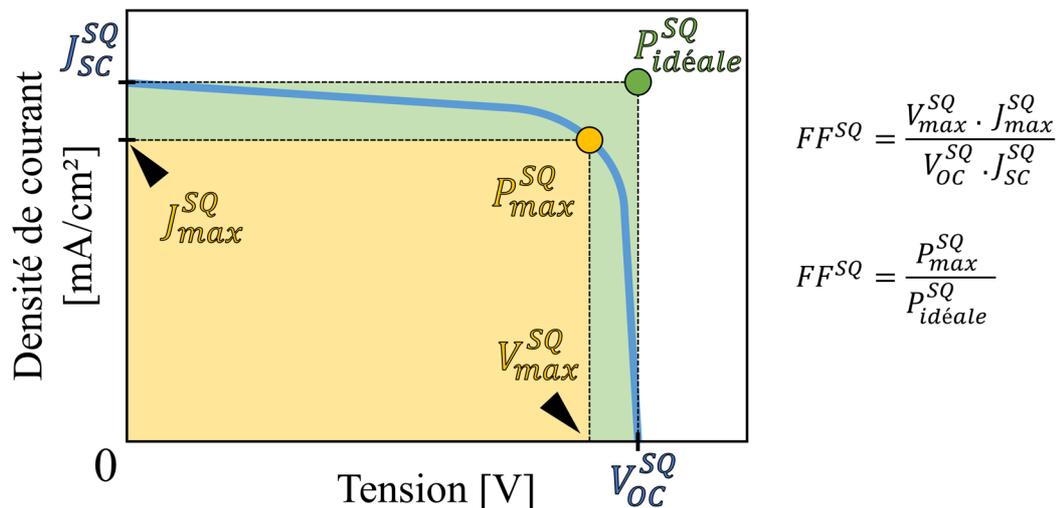


Figure 2.1 : Caractéristique courant-tension d'une jonction P-N et de différents paramètres observables utiles aux calculs de ses performances.

Dans le cas d'un semi-conducteur idéal, il est possible de considérer le courant de court-circuit produit par le convertisseur PV comme égal au photo-courant J_{ph}^{SQ} . Ce photo-courant est corrélé au nombre de photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie de bande interdite E_g du matériau utilisé pour la cellule PV à laquelle ils sont incidents :

$$J_{SC}^{SQ} = J_{ph}^{SQ} = q \int_0^{\lambda_g} \Phi_{p,\lambda} d\lambda, \quad (2.2)$$

Ici, $\Phi_{p,\lambda}$ représente le flux de photons incidents pour chaque longueur d'onde optique λ , q est la charge électrique élémentaire et λ_g correspond à la longueur d'onde qui est associée à la l'énergie de bande interdite E_g du matériau photovoltaïque.

Le facteur de remplissage du modèle Shockley-Queisser, FF^{SQ} , peut être exprimé sous la forme du modèle semi-empirique de l'approximation de Green [88] :

$$FF^{SQ} = \frac{\left[\frac{qV_{OC}^{SQ}}{kT} - \ln \left(\frac{qV_{OC}^{SQ}}{kT} + 0.72 \right) \right]}{\left(\frac{qV_{OC}^{SQ}}{kT} + 1 \right)}, \quad (2.3)$$

où k est la constante de Boltzmann et T la température de la cellule que l'on considère comme stable autour de 25 °C¹ (soit environ 300 °K). La tension en circuit ouvert, V_{OC}^{SQ} , présente de l'équation de FF^{SQ} , est définie par l'équation suivante, dans le cas d'un facteur d'idéalité égal à 1 :

¹ Dans notre cas d'étude, les cellules sont exposées à de faibles intensités lumineuses. Par conséquent, l'échauffement de la cellule, dû au rayonnement lumineux qu'elle absorbe, est négligeable. De plus, la température des environnements de bureaux varie généralement peu, car elle est souvent régulée.

$$V_{OC}^{SQ} = \frac{kT}{q} \times \ln \left(\frac{J_{ph}^{SQ}}{J_0^{SQ}} + 1 \right). \quad (2.4)$$

Finalement, la densité de courant de saturation théorique dans l'obscurité J_0^{SQ} pour une cellule à simple jonction est donnée par Shockley et Queisser [87] et Müller et coll. [66] :

$$J_0^{SQ} = qA \frac{2\pi kT}{h^3 c^2} (E_g + kT)^2 e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (2.5)$$

avec A la surface du convertisseur PV, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière dans le vide.

Ce modèle SQ, principalement connu pour avoir prédit l'efficacité limite de 33 % pour une bande interdite idéale autour de 1,14 eV sous le rayonnement du soleil standard (AM1.5G) [87], peut également être appliqué à tout type de spectre. En effet, la Figure 2.2 montre le résultat du modèle SQ lorsqu'il est appliqué à des spectres de sources de lumière naturels ou artificiels, déjà présentés dans la Figure 1.16 du chapitre précédent, sources typiques aux environnements d'intérieurs [66].

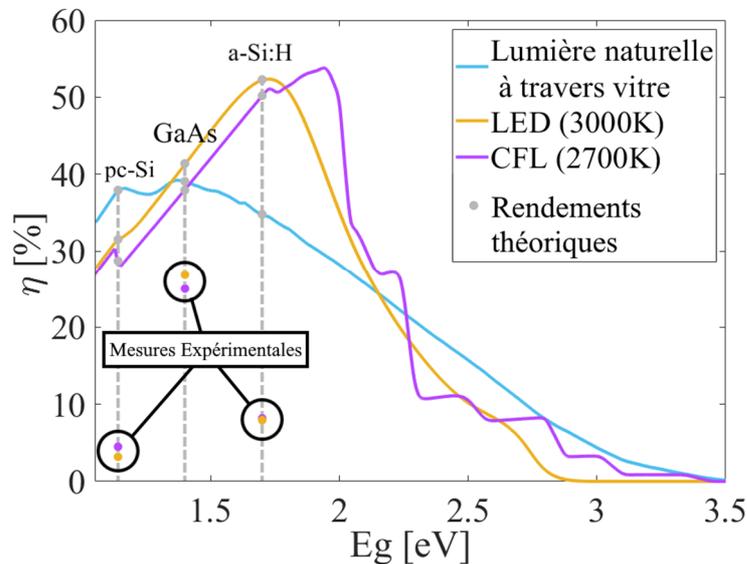


Figure 2.2 : Efficacité théorique maximale de conversion $\eta^{SQ}(E_g)$ pour une cellule à simple jonction p-n idéale basée sur le modèle SQ exposée à différentes sources de lumière : CFL, LED, et lumière naturelle venant d'une fenêtre. Les points représentent les efficacités mesurées de trois différentes technologies de convertisseurs PV sous les rayonnements CFL et LED équivalents à 500 lux.

On constate alors, comme prévu, que les rendements théoriques dépendent de la composition du spectre et que les rendements théoriques maximums pour ces types de source lumineuse sont supérieurs aux 30 % maximum pour une simple jonction idéale

soumise au spectre solaire STC AM1.5G. Par exemple, dans le cas d'une source de lumière CFL (2700K) avec un semi-conducteur théorique ayant une bande interdite (band gap) d'environ $E_g = 1,94$ eV, une efficacité de conversion de $\eta^{SQ}(E_g) = 54$ % est calculée. Dans le cas d'une LED (3000K) et dans le cas d'une lumière naturelle à travers une vitre, qui ne laisse pas passer les infrarouges, les efficacités théoriques maximales sont respectivement de 52 %, pour un band gap de 1,72 eV et de 39 %, pour un band gap de 1,37 eV.

Cependant, cette figure montre aussi que les performances de 3 types de cellules différentes sont loin d'atteindre ces niveaux de rendement sous les deux sources de lumière artificielle étudiées. Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures expérimentales réalisées avec les cellules solaires (assemblées en module) en silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) de Xiamen Mars Rock Science Technology Co., les cellules solaires PV flexibles à monojonction en arséniure de gallium (GaAs) de l'entreprise Alta Devices Inc. [89] et des cellules en silicium polycristallin (pc-Si) fabriqué par SEEDSTUDIO. Pour cela, un appareil nommé source-mètre (SMU 2450 de Keithley) a été utilisé¹. Celui-ci permet de mesurer les caractéristiques de densité de courant - tension (J-V), semblables à celle présentée dans la Figure 2.1, et cela pour les différents convertisseurs PV.

Comme le montrent les exemples de la Figure 2.3, ces mesures permettent aussi d'observer la caractéristique de densité de puissance générée par des cellules et ainsi obtenir des valeurs d'efficacité de conversion. Ces mesures sont réalisées dans des environnements lumineux d'intérieur contrôlés, c'est-à-dire que les convertisseurs sont exposés à une seule source de lumière à la fois, et à des niveaux d'irradiance ou d'intensité lumineuse choisie.

L'écart de rendement entre la théorie basée sur le modèle SQ et les valeurs expérimentales est dû à des pertes bien connues telles que : l'ombrage, la résistance en série et en dérivation, le facteur d'idéalité, l'absorption optique, la qualité des semi-conducteurs, la faible mobilité, la durée de vie des porteurs minoritaires et d'autres phénomènes physiques. Cela explique par exemple pourquoi les cellules en arséniure

¹ Chaque mesure réalisée par avec cet appareil est en réalité une moyenne de 5 mesures. La raison de cela est que les sources de lumière artificielle ont tendance à osciller en intensité et que ces oscillations peuvent perturber nos mesures. Ces oscillations ont généralement une fréquence égale à un multiple de la fréquence du réseau électrique (50 Hz en France).

de gallium, bien qu'elles n'aient pas la caractéristique de bande interdite idéale en théorie, arrivent à être bien plus performantes que les cellules en silicium amorphe.

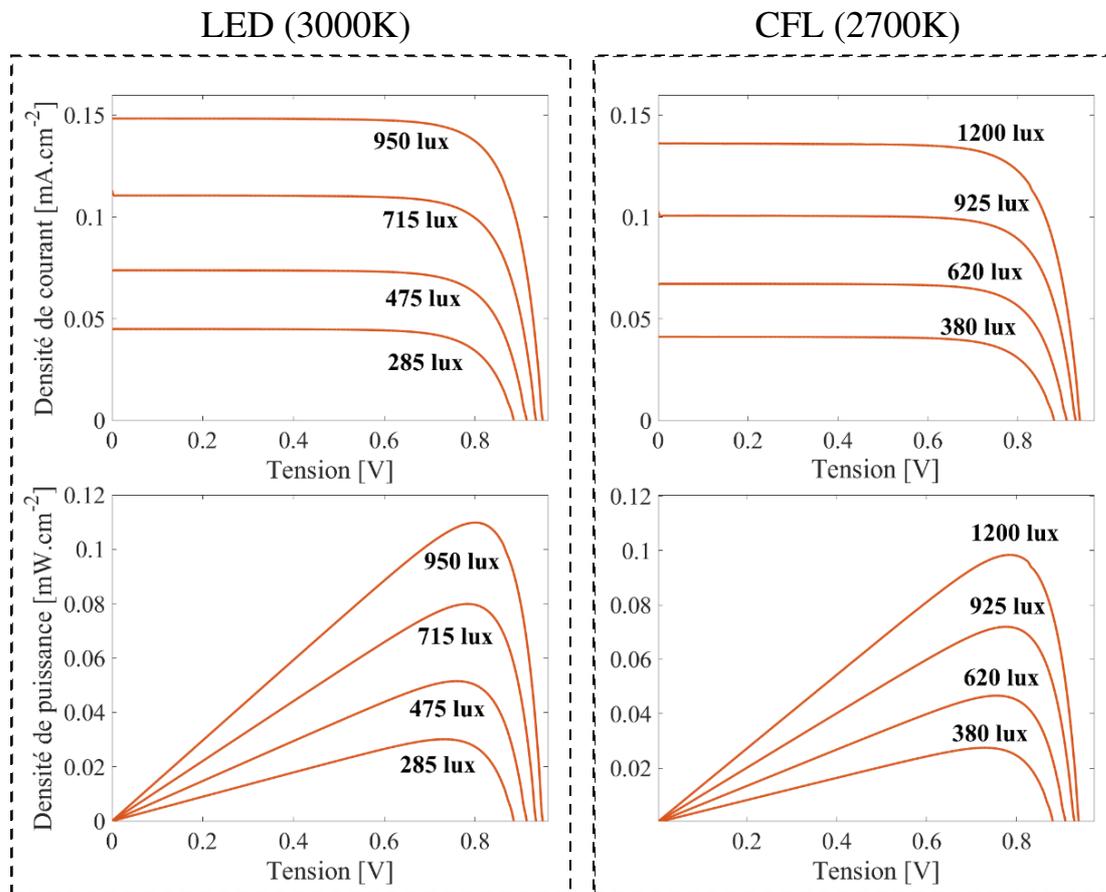


Figure 2.3 : Exemples de caractéristiques de densité de courant en fonction de la tension (J-V) et de densité de puissance (P-V) mesurées expérimentalement sur les cellules en GaAs, sous différentes intensités d'éclairage d'une lampe à LED (à gauche) et d'une lampe CFL (à droite).

À partir de l'ensemble de ces mesures, il est également possible d'observer et de comparer les valeurs des facteurs de remplissage FF^{mes} , extraites des courbes J-V expérimentales, aux mêmes valeurs de FF^{SQ} provenant des calculs du modèle SQ et qui sont toutes présentées dans la Figure 2.4.

Dans le cas des 3 convertisseurs PV commerciaux de cette étude, le facteur de remplissage expérimental (FF^{mes}) est observé en fonction de l'intensité lumineuse de la source LED. Ceux-ci augmentent à mesure que l'intensité lumineuse devient importante, ce qui correspond à ce que les calculs du modèle SQ prévoient.

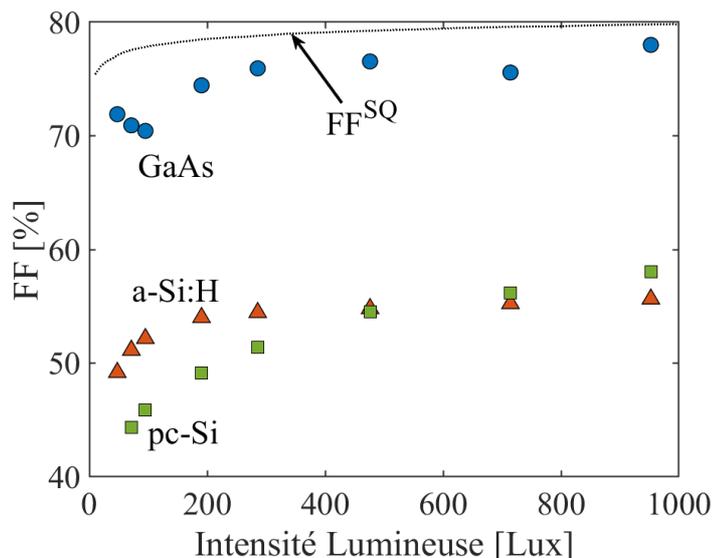


Figure 2.4 : Évolution du facteur de remplissage (FF) de cellules théoriquement idéales en fonction de l'intensité lumineuse d'une lampe à LED, comparées à la même évolution mesurée pour des convertisseurs PV commerciaux (GaAs ; a-Si:H et pc-Si).

Toutefois, la chute relative du FF^{mes} observée expérimentalement à faibles illuminations, pour toutes les technologies PV, est bien plus importante qu'en théorie. Ce phénomène est particulièrement accentué pour les cellules en silicium cristallin, probablement en raison de leur faible valeur de résistance de shunt [90]. Il est d'ailleurs communément admis que les cellules en silicium cristallin ne sont pas les cellules les mieux adaptées aux applications en intérieur où l'intensité lumineuse est souvent faible. En effet, pour des cellules exposées à de faibles valeurs d'éclairement, il est préférable d'avoir un facteur de remplissage le plus constant possible comme c'est le cas dans notre étude pour les technologies silicium amorphe (a-Si:H) et arséniure de gallium (GaAs) dont les facteurs de remplissage sont relativement plus stables entre 100 lux et 1000 lux.

Pour notre application de récupération PV en intérieur, il est certes important de pouvoir utiliser une technologie qui ne souffre pas de baisse dans son efficacité et facteur de remplissage sous faible intensité lumineuse, mais également d'une technologie dont le rendement de conversion est suffisamment grand pour permettre de ne pas avoir des surfaces de récupération trop grandes. Dans notre application, seule la cellule en GaAs présente l'avantage d'avoir un facteur de remplissage, ainsi que des rendements, les plus proches de ceux calculés à partir du modèle Shockley-Queisser et donc d'une cellule idéale (voir la Figure 2.3). Cette différence en performance par rapport aux deux autres technologies s'explique principalement par une très grande

mobilité des porteurs de charge et une relativement longue durée de vie [89]. De plus, ces cellules PV ont une surface suffisamment importante pour que l'effet surface/périmètre soit négligeable [91]. La résistance série est suffisamment faible et la résistance de shunt est suffisamment grande pour éviter d'importantes déviations du facteur de remplissage, même dans des environnements à faible niveau d'éclairage.

En conclusion, dans le cas des cellules a-Si:H et GaAs, le facteur de remplissage expérimental FF^{mes} est quasi constant dans une plage d'intensité lumineuse de 100 à 1000 lux. Cela veut dire qu'à partir de n'importe quel spectre lumineux, l'application du principe de superposition pourrait s'appliquer, même en environnement « indoor ».

La sous-section suivante s'intéresse à la description de la méthode de calcul basée sur le principe de superposition qui permet d'établir la quantité d'énergie que l'on peut extraire des cellules en environnement d'intérieur. Le modèle est appliqué principalement aux cellules en GaAs qui ont des rendements au moins 3 fois supérieurs aux autres cellules en a-Si:H de notre étude, quel que soit l'environnement lumineux d'intérieur.

2.1.2 Modèle de calcul de l'énergie récupérable en intérieur

La méthode de calcul de ce modèle se base sur l'association de trois mesures, comme l'illustre la Figure 2.5 :

- Le spectre lumineux de l'environnement et ses variations temporelles.
- La caractéristique optique du convertisseur PV, sa réponse spectrale, aussi appelée « External Quantum Efficiency » (EQE).
- La caractéristique électrique du convertisseur PV, c'est-à-dire sa caractéristique de densité de courant en fonction de la tension dans l'obscurité ($J_{dark}^{mes}-V$).

Dans notre modèle les mesures d'EQE et de courant « dark' $J_{dark}^{mes}-V$ ne sont faites qu'une seule fois par cellule¹, les résultats alimentent une base de données nécessaire

¹ Le renouvellement de ces mesures pourrait présenter un intérêt dans le cas de cellules dont la dégradation dans le temps n'est pas négligeable ou pour une étude sur le très long terme. Ce manuscrit ne prend pas en compte ces éléments pour se concentrer au développement d'un modèle fiable pour des cellules dont la réponse spectrale et des caractéristiques électriques sont considérées comme stables dans le cadre de l'application étudiée.

au modèle de superposition. La mesure du spectre lumineux est quant à elle une mesure récurrente, qui doit être renouvelée pour chaque nouvelle analyse de la puissance générée par les cellules étudiées, dans l'environnement étudié.

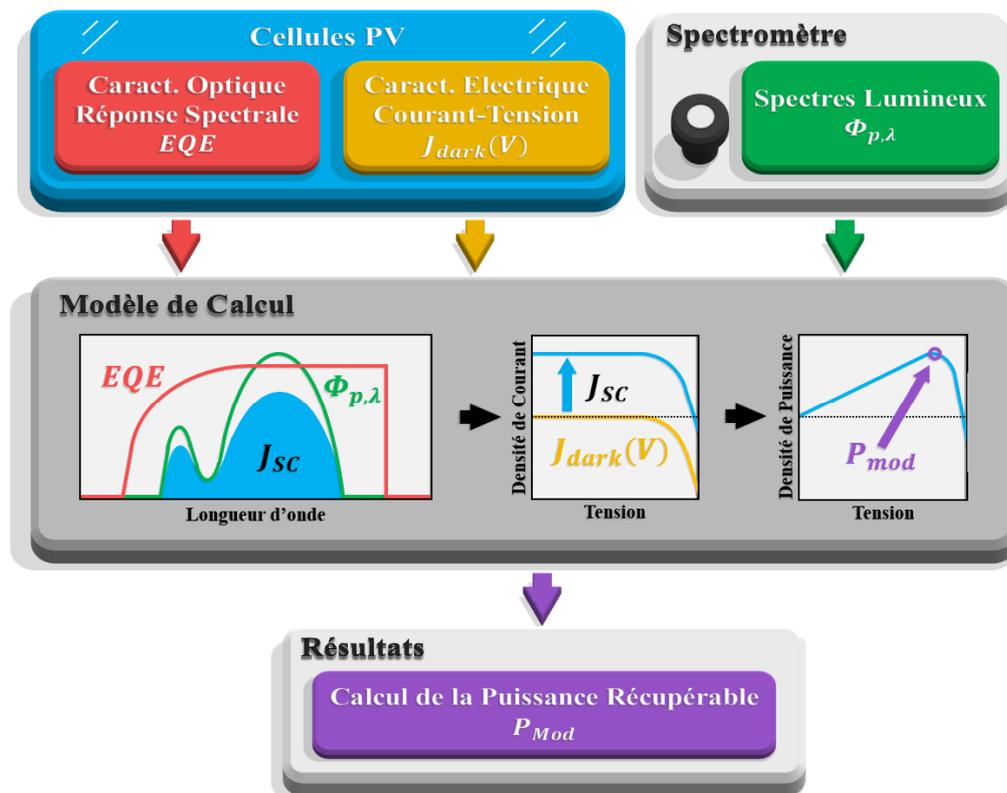


Figure 2.5 : Schéma du modèle de calcul détaillant les mesures nécessaires à l'obtention des calculs de la puissance et de l'énergie récupérable dans l'environnement observé avec la technologie de convertisseur PV choisie.

La réponse spectrale (EQE) de la cellule solaire PV exprime sa capacité à convertir, pour chaque longueur d'onde, les photons incidents en une paire électron-trou. Cette réponse spectrale est mesurée au laboratoire grâce à une lampe Xenon, un monochromateur doué de deux réseaux de diffraction, une roue de filtre qui permet de s'affranchir des plus hauts ordres de diffraction des radiations et un amplificateur à verrouillage. Les mesures sont calibrées à l'aide de photodiodes en silicium et en germanium (Thorlabs FDS100-CAL et FDG03-CAL, respectivement) de telle sorte que pour la caractérisation du convertisseur PV, l'ensemble de la plage de longueur d'onde intéressante soit couverte. Cette caractérisation ne prend cependant pas en compte l'impact de l'angle solide des radiations. Elle étudie la réponse spectrale du convertisseur photovoltaïque à un flux de photons normal à sa surface. Pour chaque bande de longueurs d'onde produite par la source, le courant généré par la cellule PV à caractériser est mesuré. Une cellule dont la réponse spectrale est connue est utilisée

comme référence de génération de courant pour établir la réponse spectrale de notre cellule par comparaison.

La caractéristique électrique utile du convertisseur pour le modèle de calcul est la densité de courant dans l'obscurité en fonction de la tension. Un source-mètre SMU 2450 de chez Keithley est utilisée pour extraire cette caractéristique. Celui-ci effectue un balayage en tension qu'il applique à la cellule dont il mesure le courant. Cette mesure est appelée « mesure I-V » pour « mesure du courant en fonction de la tension ». De manière générale, il est préférable d'exprimer ces valeurs en termes de densité de courant en fonction de la tension $J(V)$ de manière à pouvoir comparer cette valeur d'une cellule à une autre, indépendamment de leur surface.



Figure 2.6 : Spectromètre optique utilisé pour l'acquisition des données de composition spectrale de l'environnement lumineux nécessaires aux calculs du modèle.

Enfin, un spectromètre est nécessaire à l'observation de l'environnement lumineux. Celui-ci permet de connaître précisément la composition spectrale de la lumière environnante et peut ainsi renseigner le modèle de calcul sur le flux de photons qui se trouve à la surface d'un convertisseur PV. L'outil sélectionné pour cette tâche est un spectromètre compact, fabriqué par *Stellarnet Inc.*, le StellarRad dont une image est affichée dans la Figure 2.6. Cet appareil est capable d'analyser le spectre lumineux sur une gamme de longueurs d'onde qui va de 350 nm à 1100 nm. Ce choix se justifie du fait que la très grande majorité de l'énergie lumineuse présente dans les environnements d'intérieur se trouve dans cette gamme de longueurs d'onde.

Dans le modèle développé, la réponse spectrale du convertisseur photovoltaïque est ajoutée à l'équation (2.3) de manière à prendre en compte la déviation du photocourant d'une cellule PV réelle d'avec le modèle. La densité de courant J_{SC}^{RS} est donc

une estimation basée sur la mesure de la réponse spectrale du convertisseur d'énergie lumineuse et du spectre lumineux $\Phi_{p,\lambda}$ auquel celui-ci est exposé :

$$J_{SC}^{RS} = q \int_0^{\lambda_g} \Phi_{p,\lambda} \times EQE \, d\lambda. \quad (2.6)$$

Cette équation donne une estimation de la valeur de J_{SC}^{RS} qui est comme attendu moins importante que celle du cas idéal décrit par le modèle SQ. Cela tient au fait que les caractéristiques d'une cellule réelle avec ses imperfections sont prises en compte. Cette valeur de densité de courant varie en fonction de l'évolution du flux de photons mesurée dans l'environnement lumineux par le spectromètre. L'application du principe de superposition [92], [93] permet de déduire la caractéristique du courant généré par la cellule en fonction de la tension qui lui est appliquée, J^{mod} -V. Ce principe de superposition relève du modèle à une diode, un des modèles équivalents qui permettent de modéliser le comportement des cellules photovoltaïques.

$$J^{mod}(V) = J_{dark}^{meas}(V) + J_{SC}^{RS}. \quad (2.7)$$

Un exemple de cette méthode est illustré par la Figure 2.7. Celle-ci montre le spectre d'une lampe à LED (3000K) pour une intensité lumineuse de 300 lux.

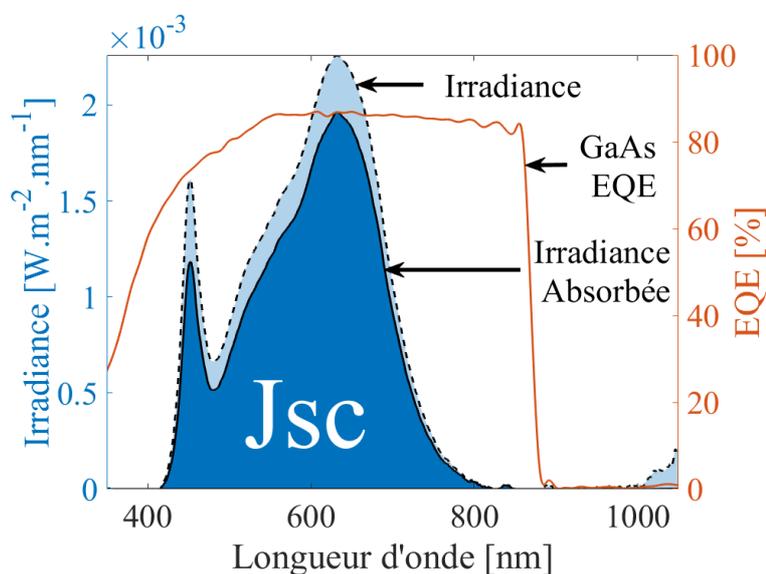


Figure 2.7 : Illustration du calcul réalisé par le modèle de la densité de courant de court-circuit J_{sc} générée par une cellule en GaAs lorsqu'elle est soumise à 300 lux d'un spectre irradié par une lampe à LED.

Associée de la réponse spectrale de la cellule en GaAs, le courant généré par cette cellule lorsqu'elle absorbe le flux de photons qui compose ce spectre peut être calculé.

La Figure 2.8 présente quant à elle le calcul de la caractéristique en densité de courant de la cellule en fonction de la tension lorsqu'elle est exposée au spectre lumineux de

la lampe à LED. Ce calcul se base sur la valeur de densité de courant photo-généré à partir de la réponse spectrale et du spectre mesuré et de la caractéristique J_{dark}^{mes} -V. La figure représente également une mesure réalisée dans l'environnement lumineux décrit (lampe LED 3000K à 300 lux) avec le source-mètre.

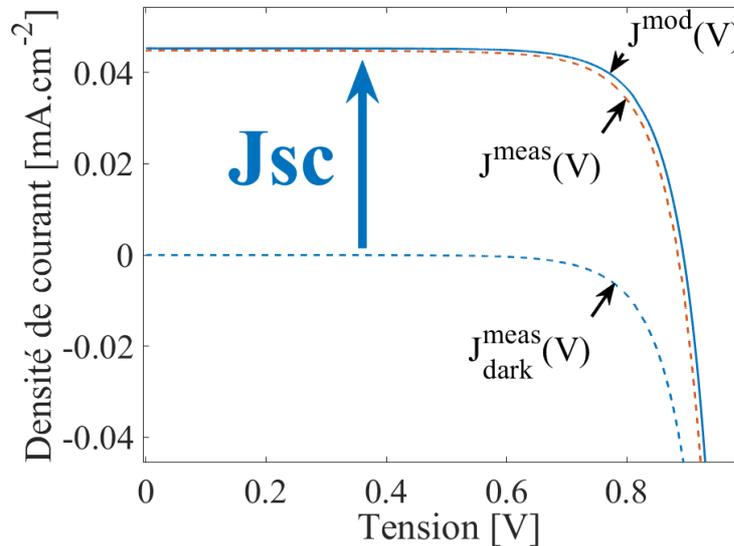


Figure 2.8 : Illustration du calcul de la caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension J^{mod} -V (trait bleu plein) de la cellule GaAs effectué par le modèle, sous un éclairage à LED (3000K). En additionnant la valeur de J_{SC} à la caractéristique en densité de courant dans l'obscurité J_{dark}^{meas} -V de la cellule en GaAs (en pointillés bleus). En pointillés orange, la caractéristique expérimentale mesurée.

Cette mesure donne la possibilité de comparer les calculs issus du modèle avec les performances réelles de la cellule. En comparant ces deux courbes, les puissances maximales mesurées P_{max}^{mes} et calculée P_{max}^{mod} sont respectivement de $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ et $31 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (sous 285 lux de rayonnement LED).

La valeur de densité de puissance maximale P_{max}^{mod} qui pourrait être extraite de cette cellule grâce à l'équation suivante :

$$P_{max}^{mod} = V_{max} \times J^{mod}(V_{max}) \quad (2.8)$$

avec V_{max} défini comme suit :

$$V_{max} = \left. \frac{d(I(V)V)}{dV} \right|_{V = V_{max}} = 0 \quad (2.9)$$

La méthode décrite ci-dessus est appliquée à une cellule GaAs exposée à des sources de lumière artificielle (CFL and LED) à différents niveaux d'intensité lumineuse (de

200 lux jusqu'à 1000 lux). Le but de cette expérimentation est de vérifier la fiabilité du modèle à une diode dans ces conditions.

Les résultats de cette première expérimentation sont présentés dans la Figure 2.9. Cette figure montre quelques caractéristiques $J^{mod}-V$ et $P^{mod}-V$ issues du modèle et comparées à leurs équivalents expérimentaux $J^{meas}-V$ et $P^{meas}-V$. Les écarts entre les courbes expérimentales et celles du modèle sont en moyenne inférieurs à 3 % et n'excèdent pas 5 % au maximum. En prenant en considération les biais expérimentaux potentiellement présents (par exemple, la distance de la source légèrement différente entre le spectromètre et la cellule), les résultats du modèle semblent suffisamment précis pour permettre un calcul fiable de la puissance électrique récupérable dans un environnement d'intérieur à faibles niveaux d'éclairage.

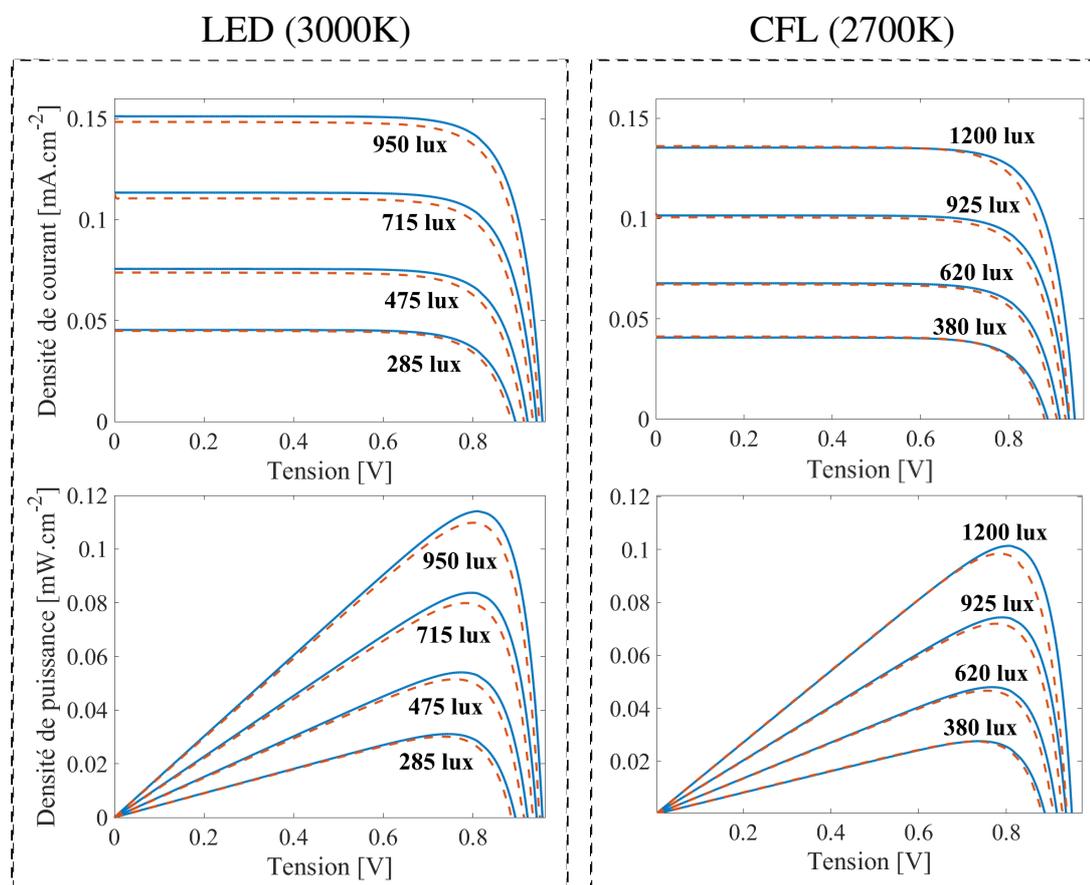


Figure 2.9 : Comparaison entre des exemples résultats de calcul du modèle (en bleu) et des mesures expérimentales (en pointillés orange) sur les cellules GaAs. À gauche : la densité de courant en fonction de la tension $J-V$ et de la densité de puissance en fonction de la tension $P-V$ sous un éclairage LED. À droite : sous l'éclairage d'une lampe CFL).

2.2 Validation du modèle en conditions réelles

Bien que les résultats présentés soient encourageants, ils ne concernent pour le moment que le calcul de la puissance optimale qui peut être extraite de la cellule. Cependant, ces puissances calculées ou même mesurées ne correspondent pas réellement à l'énergie qui peut en être extraite en pratique. Les systèmes utilisés pour cette extraction de puissance et d'énergie, appelés PMIC pour Power Management Integrated Circuit (circuit intégré de gestion de la puissance), ne sont pas parfaits. Il est donc nécessaire d'évaluer leur impact sur la récupération d'énergie. Ainsi, en incluant ces observations dans notre modèle, ce dernier pourrait effectuer des calculs d'énergie récupérable dont les résultats seraient plus proches de ce qui est récupérable en pratique.

Les pertes que peut induire un PMIC sont en partie liées à la consigne de tension qu'il va assigner à la cellule ou au module PV. En effet, ces dispositifs d'extraction de puissance cherchent à appliquer la tension qui permet d'atteindre le point de puissance maximale que peut générer la source PV. Cette méthode est appelée « Maximum Power Point Tracking » (MPPT). Si cette tension n'est pas exactement la bonne, ce point d'extraction de puissance optimal n'est pas atteint et donc la source ne délivrera pas le maximum de ce qu'elle est capable de produire, il s'agit donc d'une perte de performance.

Parallèlement à cela, ce type de dispositif nécessite une certaine quantité d'énergie pour réaliser sa tâche. Dans notre cas, le PMIC utilisé pour la récupération de très faible puissance ponctionne une partie de l'énergie qu'ils récupèrent pour fonctionner. Cette ponction d'énergie, bien que faible, contribue tout de même aux pertes liées à l'utilisation de ce type de système.

Les PMICs ont également pour rôle de convertir la puissance qui provient de la cellule PV pour la stocker, ou pour la mettre directement à disposition d'un appareil consommateur. Cela nécessite un conditionnement de cette énergie récupérée pour que le système de stockage ou le système consommateur puisse correctement la stocker ou l'utiliser. Ce conditionnement induit lui aussi des pertes. En résumé, il n'est pas possible de déterminer l'énergie récupérable dans un environnement lumineux sans prendre en compte le fonctionnement du PMIC sur celle-ci.

Les sous-sections suivantes présentent la méthodologie utilisée pour mesurer et inclure l'impact du fonctionnement du PMIC dans le modèle. Le modèle ainsi amélioré est de nouveau testé, cette fois de manière à valider sa capacité à calculer l'énergie récupérable en pratique. Cette validation consiste à comparer les résultats du modèle de calcul avec les mesures d'énergie récupérée en réalité par un prototype de récupération d'énergie complet et instrumenté. Ce prototype, utilisé dans un premier temps pour établir l'impact du PMIC sur les performances de récupérations, est présenté en détail dans la sous-section suivante.

2.2.1 Prototype de récupérateur d'énergie lumineuse

Un prototype de récupérateur d'énergie lumineuse complet a été développé afin de vérifier la validité du modèle proposé dans des conditions réelles. Comme l'illustre la Figure 2.10, ce prototype se compose de deux parties distinctes : une première partie dévolue à la récupération d'énergie, une seconde partie réservée à l'instrumentation du prototype.

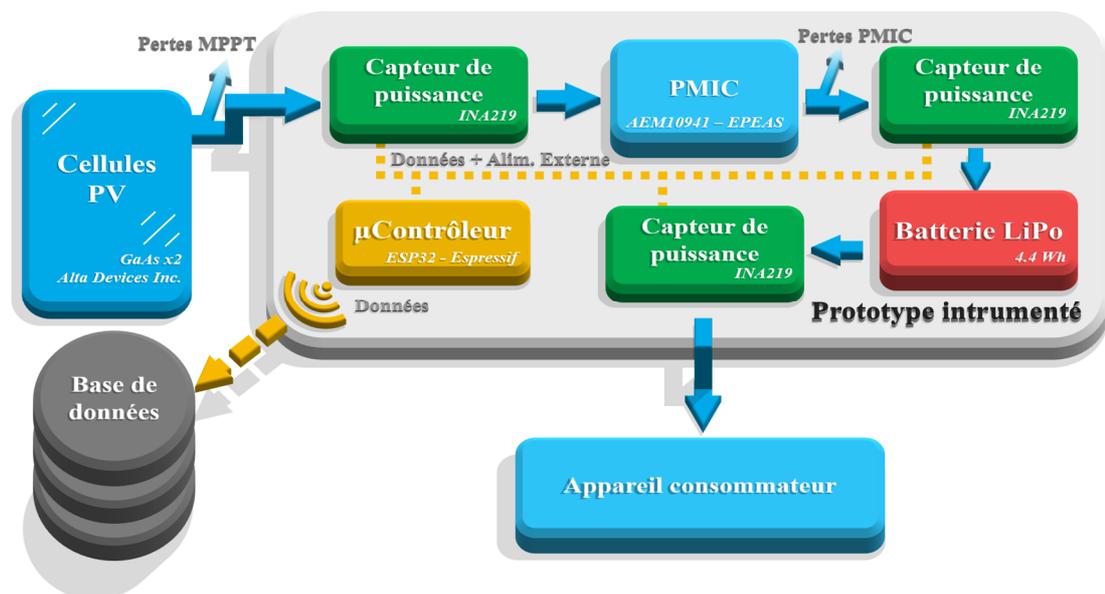


Figure 2.10 : Schéma du prototype de récupération d'énergie instrumenté. Flèches bleues : énergie produite par les cellules PV. Blocs bleus : éléments actifs de la chaîne de récupération. Le PMIC extrait et conditionne l'énergie pour la stocker dans la batterie. Batterie dans laquelle l'appareil vient consommer. Blocs verts : capteur de puissance. Bloc jaune : système de récupération des données de mesures qui les transmet à la base de données (cylindre gris) par wifi.

a. Système de récupération d'énergie

Deux cellules en couche mince en GaAs d'Alta Devices Inc. mise en série sont intégrées dans la configuration du prototype. Ce choix est en partie contraint par le

nombre de cellules qui ont pu être acquises pour cette démonstration. Dans l'idéal, comme le montrent les résultats présentés plus loin, trois ou quatre cellules en série de ce type auraient été préférables pour obtenir des rendements plus importants du PMIC.

Un PMIC commercial à très faible consommation AEM10941 conçu par E-PEAS est utilisé pour extraire la puissance générée par les cellules et la conditionner de manière qu'elle puisse être stockée dans une batterie. Ce produit en particulier a été choisi pour le très faible courant qu'il consomme au repos (entre $0,4 \mu\text{A}$ et $0,6 \mu\text{A}$) et un rendement qui peut atteindre 95 %. Les rendements atteignables à l'aide d'autres PMIC proposés sur le marché sont généralement inférieurs en performances par rapport au AEM10941 et ont des courants de repos plus importants [94]–[96].

L'efficacité du AEM10941 donnée par le fabricant configuré pour la recharge d'une batterie en lithium polymère est présentée dans la Figure 2.11.

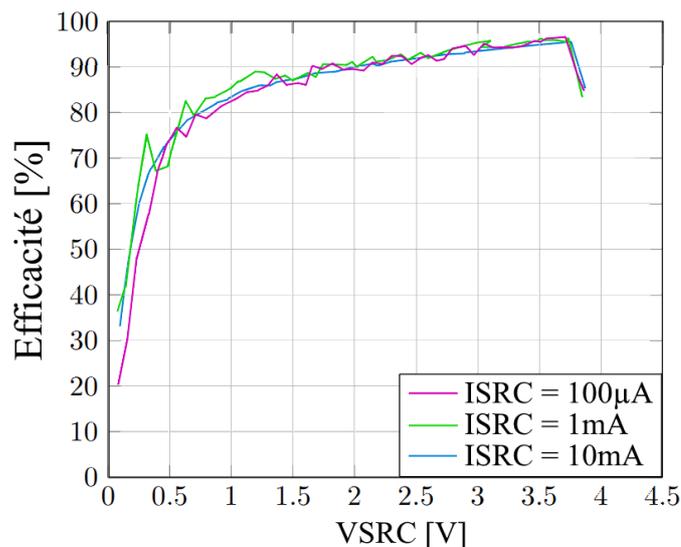


Figure 2.11 : Efficacité du PMIC AEM10941 fabriqué par E-PEAS en fonction de la tension de récupération applicable au convertisseur PV pour une tension de recharge de la batterie de 4,1 V. Les trois courbes représentent l'efficacité du système pour différents courants de récupération.

Pour atteindre des performances importantes de récupération d'énergie, ce PMIC utilise un algorithme de recherche du point maximum de puissance (MPPT). De nombreux algorithmes existent, celui implémenté dans le AEM10941 est appelé « Fractional Open-Circuit Voltage » (FOCV) qui consiste, comme son nom l'indique, à appliquer au convertisseur PV une tension V_{FOCV} égale à une fraction K de sa tension (voir Figure 2.12) de circuit ouvert. Cette tension doit s'approcher au

maximum de la tension de manière à atteindre le point de puissance maximum de la source PV [97]. Dans l'idéal, V_{FOCV} doit être égale V_{max} .

$$V_{FOCV} = K \times V_{OC} \quad \text{avec } K = \frac{V_{max}}{V_{OC}} \quad (10)$$

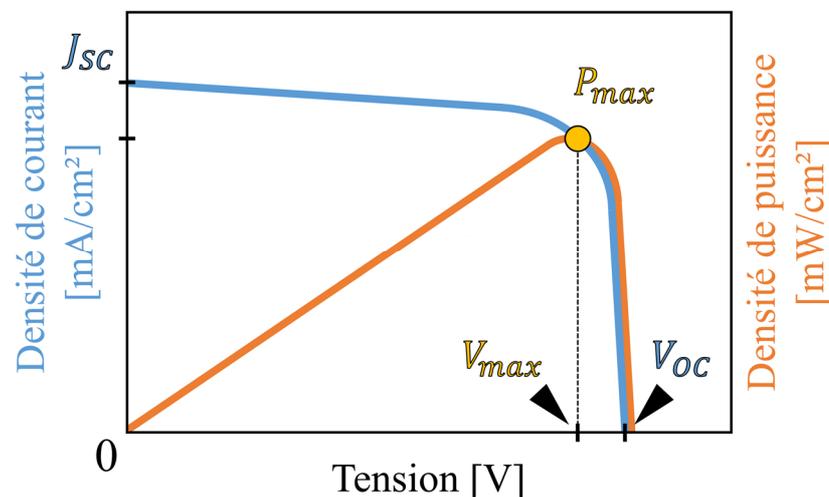


Figure 2.12 : Illustration du calcul de la fraction de la tension de circuit ouvert (FOCV).

Bien qu'il ne soit pas le plus performant en comparaison d'autres algorithmes de la littérature, cet algorithme MPPT est très approprié à la récupération d'énergie lumineuse sous faible éclaircissement [98].

En pratique, le PMIC AEM10941 est constitué de différentes fonctions qui sont décrites dans le schéma fonctionnel simplifié du AEM10941 fourni par le fabricant et affiché dans la Figure 2.13.

Son fonctionnement est le suivant : à un intervalle d'environ cinq secondes, le transistor M1 ouvre le circuit pendant 82 ms de sorte que la tension de circuit ouvert soit mesurée et qu'ainsi le niveau de tension optimal soit défini. Cette tension est calculée comme une fraction de celle de circuit ouvert. La fraction est définie par l'utilisateur et peut être sélectionnée à l'aide de jumpers ou de résistance. Quatre différentes valeurs de K peuvent être choisies : 70, 75, 85 ou 90 % de la valeur de V_{OC} . Cette valeur doit être choisie en fonction de la technologie utilisée de convertisseur d'énergie lumineuse. Généralement, cette fraction du V_{OC} à laquelle la cellule génère son maximum de puissance reste sensiblement la même dans la gamme d'intensité lumineuse dans laquelle son facteur de remplissage reste relativement égal (voir la Figure 2.4).

Dans le cas des cellules en GaAs utilisées pour le prototype, les résultats de la Figure 2.9 montrent que leur point de puissance maximum se situe à une tension entre 82,5 et 84,3 % de celle de la tension de circuit ouvert. Dans ce cas-là, pour maximiser les chances de récupérer le plus de puissance possible des cellules, la configuration choisie du PMIC est celle qui lui permet de viser 85 % de la valeur de V_{OC} des cellules.

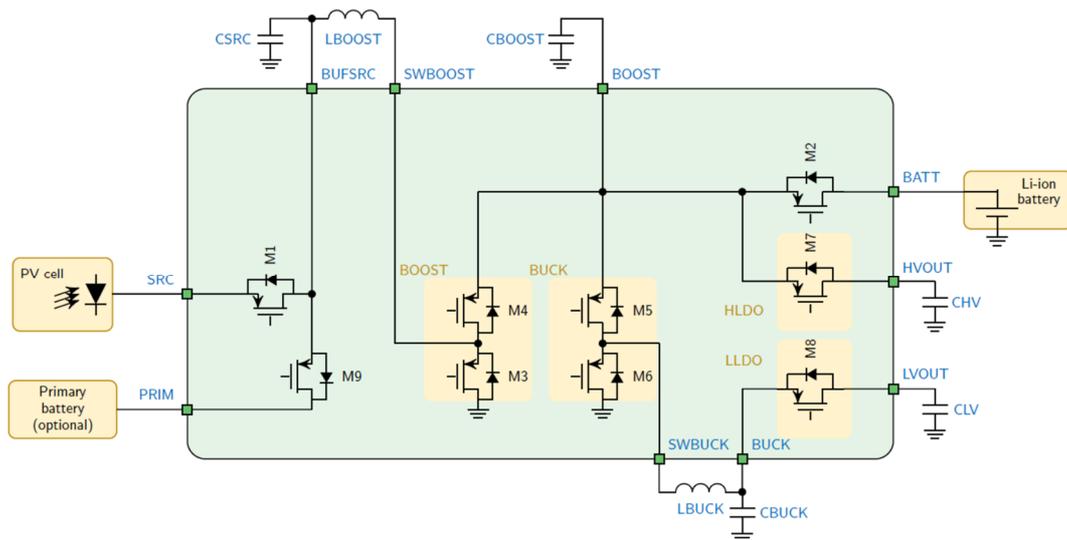


Figure 2.13 : Schéma fonctionnel simplifié du PMIC AEM10941 fabriqué par E-PEAS [99].

Les transistors de commande M3 et M4 s'occupent quant à eux de la conversion de l'énergie stockée dans le circuit réactif. Ces transistors fonctionnent de telle manière à ce que la tension qu'ils imposent aux bornes du condensateur CSRC reste toujours dans une gamme de valeur très proche de celle calculée précédemment. Enfin, le transistor M2 est dédié au transfert de l'énergie récupérée en amont par le circuit dans la batterie connectée au PMIC. Dans notre cas, la batterie choisie est une batterie à base de lithium polymère d'une capacité énergétique de 4,4 Wh. Le PMIC peut être configuré en fonction du type d'élément de stockage choisi. La commande du transistor M2 est adaptée au type de stockage et à la tension à ses bornes pour éviter les surcharges ou les décharges trop importantes.

b. Instrumentation

Une autre partie importante du prototype est l'instrumentation qu'il embarque. Un ensemble de capteurs de courant et de tension (INA219 de Texas Instrument) sont disposés entre les cellules et le PMIC, entre le PMIC et la batterie et entre la batterie et l'appareil à alimenter. Ces trois points de mesures du courant et de la

tension permettent d'observer la puissance transmise d'un point à un autre de la chaîne de récupération d'énergie.

Ces capteurs effectuent des mesures de courant grâce à des résistances de faible valeur appelées résistances « Shunt » au travers desquelles le courant doit passer. De cette manière, une légère chute de tension, proportionnelle au courant, est créée et observée par ces capteurs. Pour obtenir des résolutions de mesures de la puissance consommée de l'ordre de $1 \mu\text{W}$, des résistances de 5Ω sont utilisées. Ces résistances ont une valeur suffisamment grande pour entraîner une chute de tension importante qui pourrait induire une erreur non négligeable aux mesures effectuées. Par exemple, pour un courant supérieur à 20 mA , la chute de tension imposée par les résistances est supérieure à 100 mV et induit une erreur sur les mesures de puissance récupérée supérieure à 5% . Dans des cas de courants plus importants, cette chute de tension peut aller jusqu'à rendre le prototype inopérant¹.

Dans notre cas, les intensités lumineuses les plus importantes attendues dans notre environnement sont autour de 2000 lux . Sous ces niveaux d'intensité lumineuse, les cellules utilisées pour ce prototype peuvent générer une densité de courant de $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ avec une tension de récupération optimale (V_{max}) aux alentours de $0,85 \text{ V}$. Cela donne un courant d'environ $5,2 \text{ mA}$ pour 17 cm^2 de surface de récupération et une tension de $1,7 \text{ V}$, soit $8,8 \text{ mW}$ de puissance générée. La chute de tension obtenue aux bornes des résistances au passage de ce courant serait alors de 26 mV . L'erreur induite par cette chute de tension sur la lecture de la puissance extraite des cellules serait de $1,5 \%$. C'est un niveau maximum d'erreur attendue suffisamment faible pour ne pas risquer d'induire d'importantes erreurs dans les mesures.

Le contrôle de ces capteurs de puissances est réalisé par un microcontrôleur (ESP32 d'Espressif embarqué sur une carte de développement HUZAZH32 d'Adafruit). Celui-ci coordonne les capteurs pour qu'ils réalisent une mesure toutes les 10 ms . Cet intervalle de temps est suffisant pour que le microcontrôleur interroge les

¹ Dans certains cas où le courant passant à travers la résistance de shunt est trop important, la chute de tension peut être suffisante pour que le PMIC ne puisse pas effectuer correctement ses mesures sur la cellule pour établir la tension de consigne. De l'autre côté du PMIC, l'application d'un courant important peut rendre la recharge d'une batterie inopérante à cause de la chute de tension trop grande.

capteurs et récolte leurs mesures, mais ne lui permet pas de les transmettre à une base de données.

Un second microcontrôleur (une HUZZAH32 également) est ajouté pour se charger de l'envoi des données. Le premier microcontrôleur se charge alors de faire la moyenne des mesures réalisées sur un intervalle de 2000 ms et envoie le résultat de ce calcul au second avant de reprendre l'acquisition des données. Les valeurs moyennes sont ensuite envoyées par le deuxième microcontrôleur, via une communication wifi, au serveur qui héberge la base de données qui stocke l'ensemble des mesures. Il est ensuite possible de récupérer, depuis la base de données, la quantité de puissance et d'énergie récoltée qui ont été mesurées pour les analyser et les comparer aux résultats du modèle de calcul. Il est également possible d'observer ces données sur le site web hébergé par le serveur à l'adresse suivante : bastienpoliti.fr/ProtoPower.php.

Les codes et scripts développés pour réaliser les tâches effectuées par le prototype, décrites ci-dessus, sont disponibles dans les Annexes de ce manuscrit.

Afin de ne pas affecter la récupération d'énergie du système, les microcontrôleurs et les capteurs de puissances sont alimentés par une source annexe d'électricité. De cette manière il est possible de mesurer la puissance transportée entre les différents points du système comme si celui-ci était non instrumenté.

c. Réalisation du prototype

Les composants décrits précédemment sont assemblés ensemble grâce à un circuit imprimé spécialement conçu spécialement dans ce but (Figure 2.14).

Cette carte permet aux deux microcontrôleurs de communiquer ensemble. Elle connecte également les ports de communication I2C des capteurs de puissance INA219 qui ont chacun une adresse différente pour ce protocole. Un sélecteur linéaire est intégré à la carte pour sélectionner le mode de fonctionnement du prototype. Selon la position du sélecteur les microcontrôleurs s'initialisent pour que les données qu'ils récupèrent soient stockées sur une carte SD, ou alors envoyées sur la base de données du serveur web. La Figure 2.15 présente une photographie de la carte une fois assemblée.

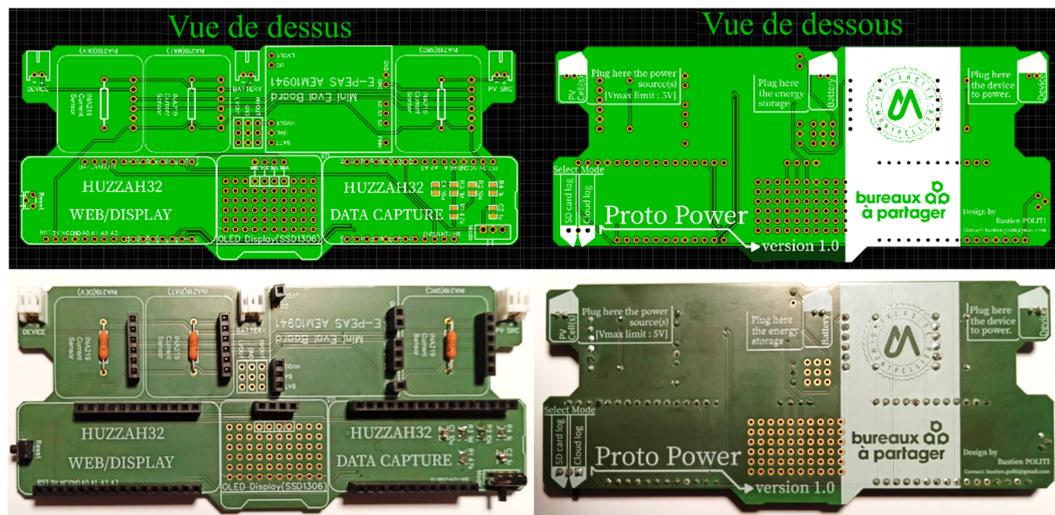


Figure 2.14 : Circuit imprimé développé pour assembler le prototype instrumenté de récupération d'énergie lumineuse.

Un écran OLED est présent sur le prototype afin d'assurer à l'utilisateur la possibilité de vérifier si le lancement et le suivi de l'acquisition des données se déroulent correctement. Si une déconnexion malencontreuse des cellules, de la batterie ou de l'appareil consommateur arrive, les valeurs affichées par l'écran permettent de facilement détecter ce genre de problème. L'écran permet aussi de savoir si la connexion au routeur est bien établie et si les données mesurées sont transférées au serveur avec succès ou non.

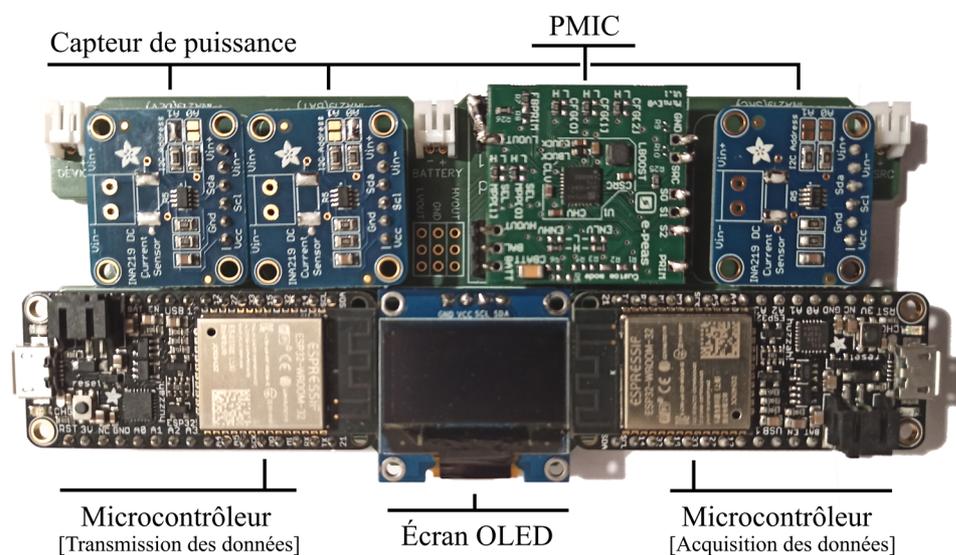


Figure 2.15 : Carte de récupération d'énergie instrumentée une fois assemblée. Elle embarque le PMIC, les deux microcontrôleurs chargés de réceptionner les données des trois capteurs de puissances et un écran OLED.

Une fois les connecteurs et les résistances de précisions soudés, l'ensemble des éléments peuvent y être connectés. Après avoir branché la batterie et les cellules

GaAs aux connecteurs correspondants comme le montre la Figure 2.16, il est possible d'alimenter un appareil consommateur d'énergie tel que la tablette Joan en le connectant au dernier connecteur disponible, en haut à gauche du circuit imprimé.

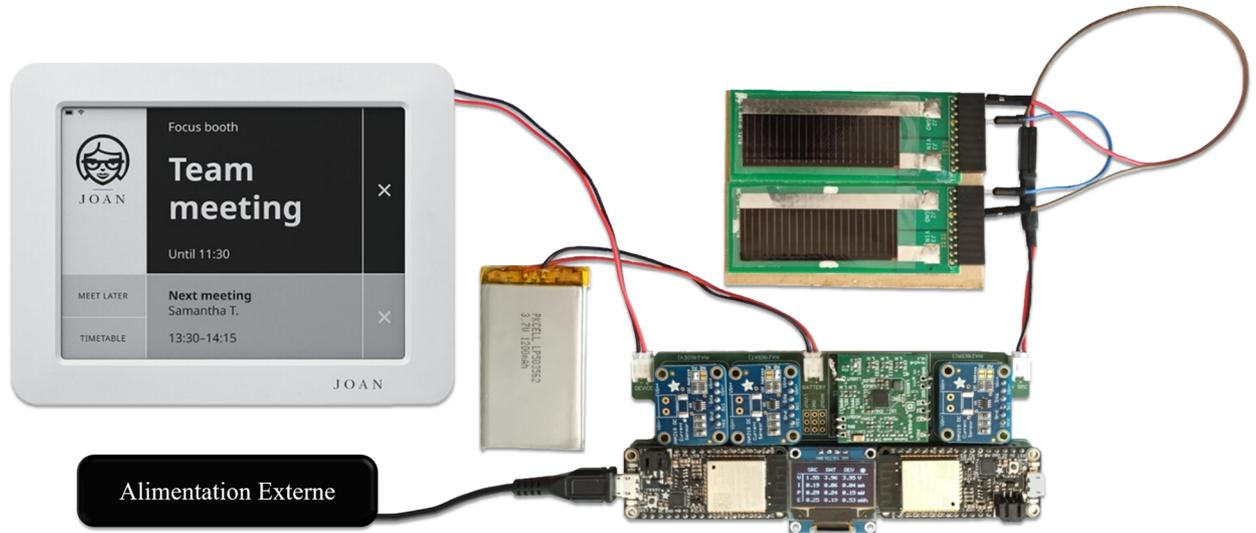


Figure 2.16 : Prototype assemblé, alimenté par deux cellules en GaAs (haut de l'image) et qui stocke l'énergie qu'elles produisent dans la batterie (à gauche de l'image). Un appareil tel que la tablette Joan peut y être branché en le reliant au connecteur à l'extrémité supérieure gauche du circuit imprimé.

2.2.2 Ajustement du modèle de calcul

Pour que les calculs du modèle soient en adéquation avec les mesures expérimentales, il faut obligatoirement tenir compte de l'impact du PMIC sur la récupération d'énergie du système. Grâce aux mesures de récupération réalisées sur le prototype, les caractéristiques de rendement du PMIC ont pu être calculées. Ce sont les mesures de la puissance extraite des cellules PV (P_{SRC}) et la puissance sortante du PMIC (P_{PMIC}) qui permettent le calcul de ce rendement η_{PMIC} , décrit par l'expression suivante :

$$\eta_{PMIC} = \frac{P_{PMIC}}{P_{SRC}} \quad (10)$$

La Figure 2.17 illustre le rendement du PMIC calculé sur la base d'une des journées observées. Dans cette figure, on peut noter que les rendements atteints par le PMIC intégré au prototype correspondent aux rendements prévus dans sa documentation (Figure 2.11).

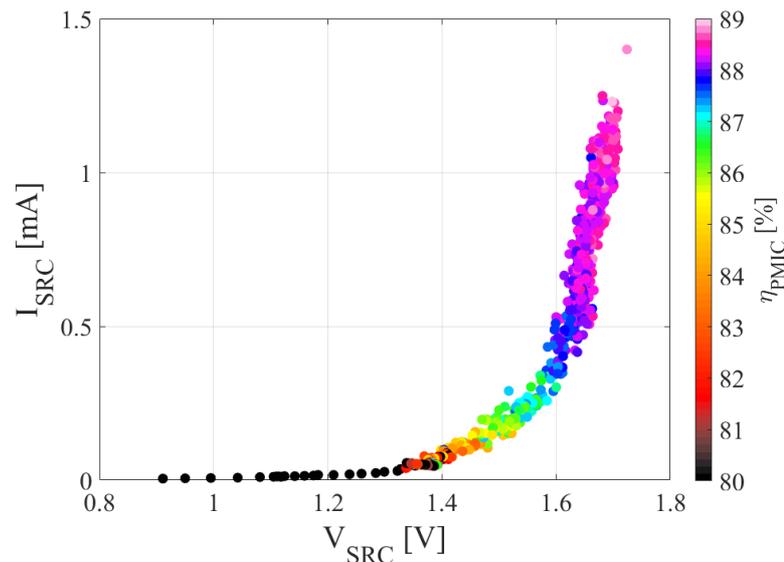


Figure 2.17 : Valeur de rendement du PMIC une fois intégré au prototype. Mesures réalisées au long d'une journée avec une puissance générée par les cellules allant de 0 à 2 mW.

Ces mesures permettent d'établir empiriquement une équation $\eta_{PMIC}(I, V)$ qui modélise l'évolution du rendement de ce système en fonction de la tension et du courant d'extraction de la puissance générée par la cellule. Cette équation peut ensuite être intégrée au modèle de calcul de l'énergie récupérable. Cependant, l'équation définie de cette manière ne peut s'appliquer qu'au prototype dans cette configuration. C'est-à-dire qu'elle s'applique uniquement à une configuration avec deux cellules en GaAs de chez Alta Devices Inc. mises en série. Pour obtenir l'équation qui modélise les performances du PMIC avec d'autres configurations, la même technique doit être appliquée, mais avec les mesures réalisées sur le prototype dans ces autres configurations.

Afin de déterminer cette équation, fonction des deux variables, l'outil « Curve Fitting Tool » développé par MATLAB est utilisé. Dans le cas qui nous occupe, cet outil est utilisé pour rechercher une équation polynomiale qui s'accorde au mieux aux rendements mesurés. L'équation obtenue ne peut pas être considérée comme une loi empirique de l'évolution du rendement du PMIC en fonction de la tension et du courant. Il s'agit uniquement d'un outil de calcul de ce rendement en fonction des valeurs de tension et de courant calculées par le modèle pour la configuration utilisée dans cet exemple.

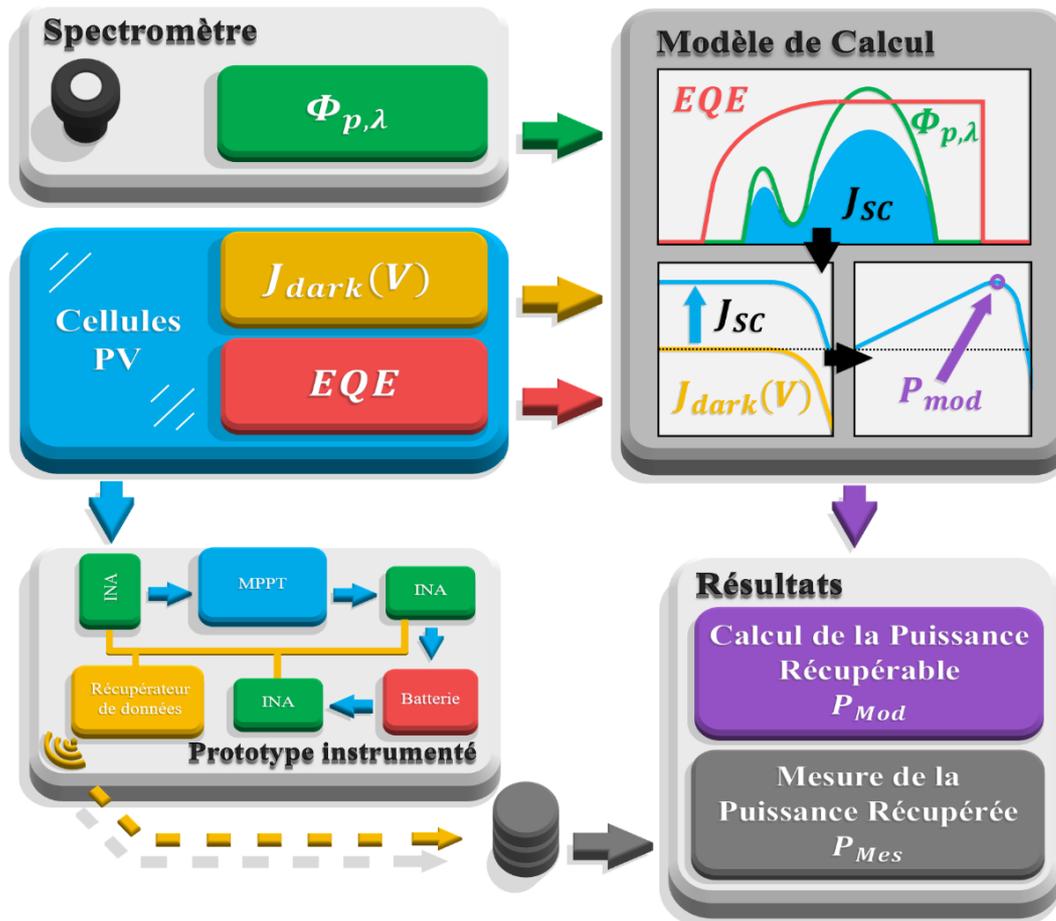


Figure 2.18 : Schéma du système d'analyse de l'environnement lumineux. Association du modèle avec les mesures qu'il requiert et du prototype pour obtenir des résultats de calculs et de mesures pouvant être comparés afin de déterminer la précision du modèle.

Après avoir déterminé l'équation de rendement du PMIC, le modèle de calcul doit être modifié pour prendre en compte ce nouvel élément dans ces calculs.

Pour cela, l'équation (2.8) de calcul de la puissance récupérable avec le PMIC doit être modifiée pour ne plus prendre en compte comme tension de récupération V_{max} , mais la valeur de $K \times V_{OC}$ (la valeur fixée à 85 % dans notre cas). Elle doit également pouvoir calculer le rendement du PMIC en fonction de la tension et du courant qui sont appliqués, grâce à la fonction $\eta_{PMIC}(I, V)$ créée précédemment. Ainsi, en appliquant cette valeur de rendement, la nouvelle valeur de puissance récupérable peut être calculée, l'équation suivante décrit ce calcul :

$$P^{mod} = V_{PMIC} \times J^{mod}(V_{PMIC}) \times \eta_{PMIC}(V_{PMIC}, J^{mod}(V_{PMIC})) \quad (2.11)$$

Avec

$$V_{PMIC} = K \cdot V_{OC} \quad (2.12)$$

L'utilisation du modèle de calcul amélioré, accompagné du spectromètre, est alors envisageable pour calculer l'énergie récupérable en pratique. Comme le montre la Figure 2.18, le modèle amélioré peut maintenant être confronté au prototype, pour évaluer s'il arrive à des résultats de calculs de l'énergie récupérable proches de ceux mesurés en pratique.

2.2.3 Expérimentation et confrontation des résultats

Une série de mesures est effectuée afin de réaliser cette comparaison. Cette série d'expérimentations consiste à déployer le prototype conjointement au spectromètre qui alimente le modèle. L'environnement de déploiement est un bureau de particulier¹. Cet ensemble est ensuite laissé durant une journée pour suivre l'évolution de l'environnement lumineux et de l'énergie qui peut en être récupérée. Cette expérimentation a été reproduite 21 fois pour évaluer le modèle dans différentes conditions de variations lumineuses liées aux phénomènes météorologiques. Comme le montrent les clichés de la Figure 2.19 pris à différents moments de la journée et pour différents jours, les variations de lumière peuvent être importantes.



Figure 2.19 : Environnement de déploiement du prototype et du spectromètre pour l'expérimentation de validation du modèle de calcul. De gauche à droite : Période de très beau temps, ciel bleu, forte intensité lumineuse ; période de passage nuageux, luminosité diffuse ; période d'éclairage mixte naturel/artificiel ; période d'utilisation d'éclairage artificiel (nuit).

¹ La situation sanitaire de 2020 n'a pas permis de réaliser ces tests, programmés en début d'année, dans les locaux de BAP.

Le prototype et le spectromètre sont placés au même emplacement que celui de l'appareil photo utilisé pour prendre les clichés précédents. La Figure 2.20 montre le système de mesure une fois totalement assemblé, prêt à être utilisé pour l'expérimentation et installé sur un trépied spécialement conçu pour cela.

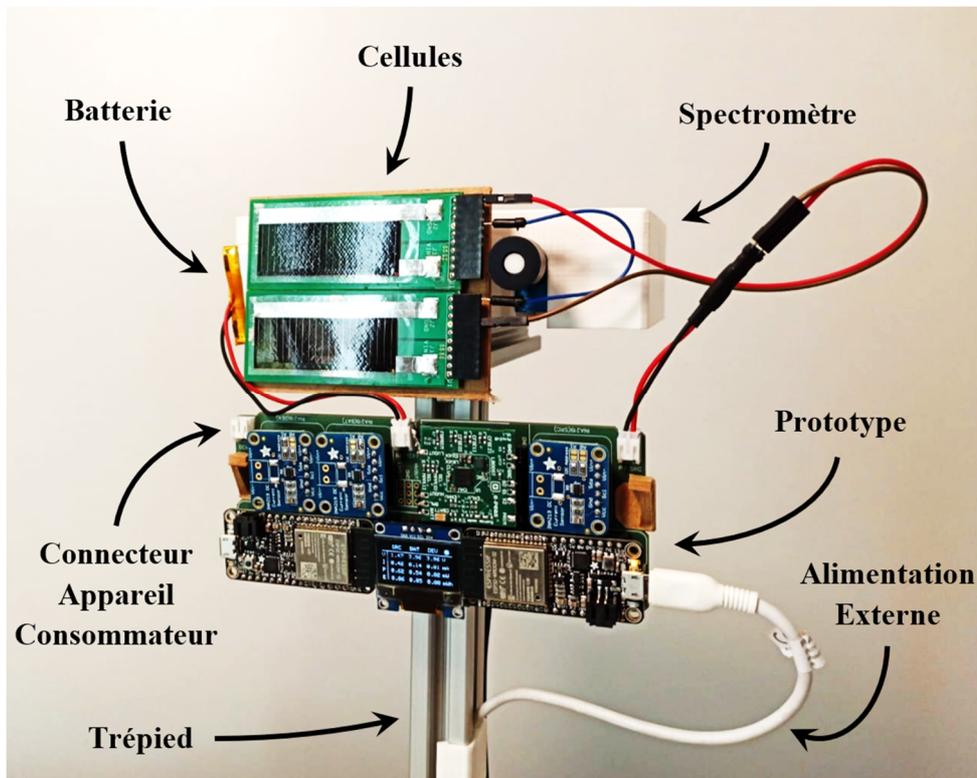


Figure 2.20 : Système complet de mesure en cours d'utilisation, sans appareil consommateur connecté.

Les mesures du spectromètre sont réalisées à un intervalle de 60 secondes. En moyenne, cela donne l'équivalent de 1000 à 1400 mesures pour une expérimentation d'une journée en fonction de son heure de démarrage et de fin. Le prototype est configuré de manière à effectuer ses mesures à un intervalle de 10 ms et à envoyer à la base de données, toutes les minutes, la moyenne de ces valeurs sur intervalle de temps entre deux envois.

Ainsi, après avoir réalisé les calculs de l'énergie récupérable, les résultats du modèle peuvent être comparés à ceux du prototype.

Deux séries de résultats sont exposées dans la Figure 2.21. Celles-ci comparent les résultats obtenus des mesures faites sur le prototype avec les résultats de calculs du modèle à partir des mesures du spectromètre.

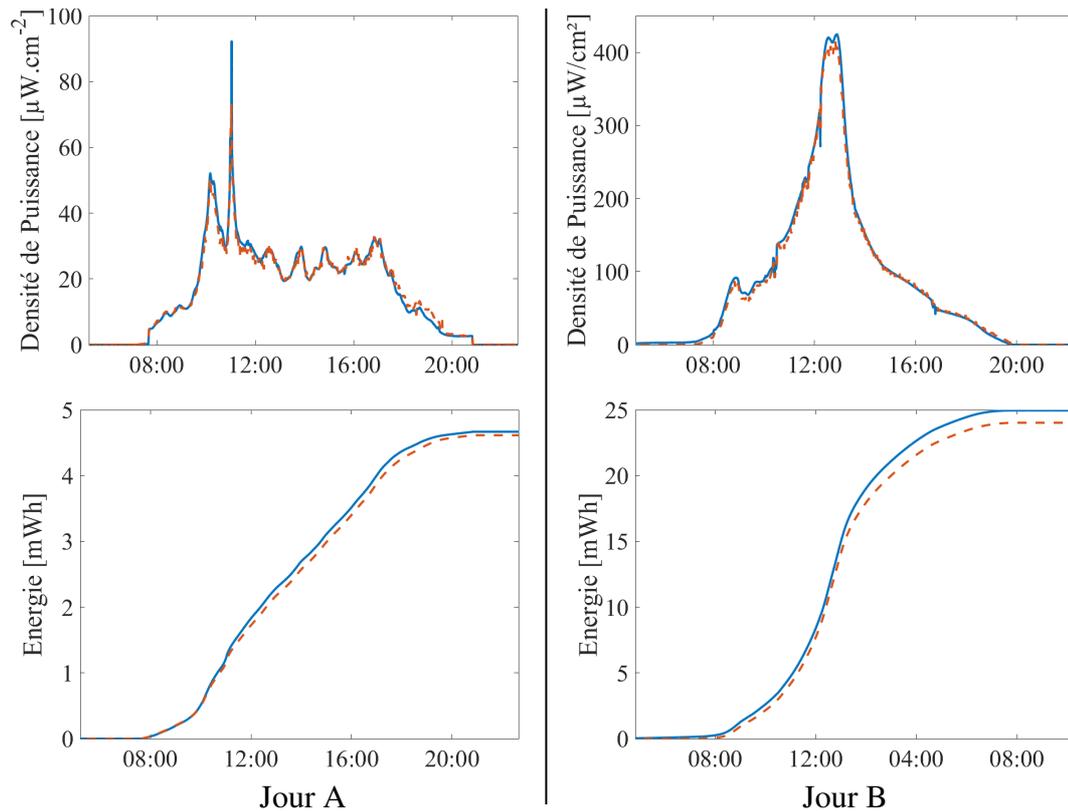


Figure 2.21 : Comparaison des résultats de l'expérimentation de validation du modèle de calcul. En bleu : la puissance et l'énergie qui devraient être transmises à la batterie selon les calculs du modèle. En pointillés rouges : les mesures de puissance et d'énergie transmises à la batterie du prototype.

Comme le montre cette figure, bien que les niveaux de récupération d'énergie varient considérablement (Jour A peu ensoleillé, contrairement au jour B), le modèle arrive à des résultats proches de la réalité. Pour l'ensemble de mesures réalisées pour 21 jours d'expérimentation, le moyen retenu pour établir le degré de précision du spectromètre est le pourcentage d'erreur absolu moyen (en anglais : Mean Absolute Percentage Error ou MAPE). Cet indicateur est calculé à partir du résultat final d'énergie récupérée donné par le prototype et calculé par le modèle en utilisant la formule suivante :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i^n \left| \frac{A_i - E_i}{A_i} \right| \quad (2.13)$$

Où n est le nombre d'expérimentations menées, A_i est la valeur d'énergie mesurée lors d'une expérimentation i et finalement, E_i est la valeur d'énergie calculée par le modèle comme récupérable par le prototype. Ce calcul donne comme résultats que sur l'ensemble de ces expérimentations, la valeur de MAPE est inférieure à 6 %. Cela

correspond à une surestimation de la part du modèle de l'énergie récupérable par le prototype.

Une des raisons de cet écart, qui reste raisonnable, est que le modèle utilisé reste trop simpliste. Il s'agit avant tout dans les travaux présentés ici de développer une méthode qui soit complète, qui soit suffisamment robuste pour évaluer correctement l'énergie récupérable. De plus, avoir un modèle plus simple donne la possibilité de l'implémenter plus facilement.

Finalement, en ce qui concerne la possibilité de rendre autonome le système d'affichage de BAP, les mesures de consommation effectuées lui donnent une consommation moyenne d'environ 30 mWh, durant les 12 h de son fonctionnement quotidien, soit 360 mWh consommés par jour. Dans le cas d'un fonctionnement uniquement durant les jours de la semaine, la moyenne de consommation d'énergie par jour de cet appareil tombe à 257 mWh. Cela correspond à une consommation continue d'une puissance de 10,7 mW.

Sur les 21 jours d'analyse réalisée par le prototype, l'énergie récupérée par jour avec les deux cellules en GaAs mises en série est en moyenne de 18,5 mWh, soit 1.07 mWh/cm².



Figure 2.22 : Représentation d'un récupérateur d'énergie ayant une surface de récupération d'énergie d'environ 250 cm² et qui selon les expérimentations réalisées devrait suffire à rendre autonome la tablette d'affichage.

À partir de ces chiffres et dans les conditions lumineuses observées par le prototype, la surface minimum de cellules nécessaires pour compenser la consommation de la

tablette d'affichage serait d'environ 250 cm². C'est une surface équivalente à celle d'une enveloppe au format DL (le format le plus couramment reçu) et cela nécessiterait d'utiliser au minimum 29 cellules en GaAs. La Figure 2.22 donne un aperçu de ce à quoi pourrait ressembler un tel récupérateur d'énergie.

2.3 Conclusion du chapitre

La méthode et le système d'analyse présentés dans ce chapitre sont prometteurs. Les résultats obtenus avec le modèle de calcul, grâce aux mesures du spectromètre, ont montré que ce système d'analyse est capable d'évaluer l'énergie récupérable, en pratique et dans un environnement lumineux réel avec un pourcentage moyen d'erreur absolue inférieure à 6 %. Ces résultats ont été obtenus pour 21 mesures d'une journée chacune et effectués dans des conditions de lumière très différentes (grand soleil, ciel voilé, journée nuageuse, jour pluvieux, lumière artificielle, mélange de lumière naturelle et artificielle).

Grâce au prototype de récupérateur d'énergie, qui a permis de valider cette méthode et de confirmer que l'approche proposée est viable, il est également possible d'affirmer que l'alimentation d'un système d'affichage tel que celui de BAP, consommant plus de 10 mW en moyenne, peut être alimentée de manière autonome par un récupérateur d'énergie avec une surface d'environ 250 cm² (16 x 16 cm).

Des perspectives d'améliorations sont tout de même envisageables pour cette méthode d'évaluation. Par exemple en s'orientant vers des modèles plus perfectionnés comme celui proposé par Brano et coll. en 2010 [100]. En effet, ce type de modèle va plus loin dans la caractérisation des convertisseurs PV en réalisant des mesures sous un éclairage de référence (AM1.5G, soleil artificiel). Ces tests permettent alors de déduire les valeurs des résistances (R_s et R_{sh}), du modèle équivalent à une diode, qui peuvent ainsi être intégrées dans le modèle de calcul. En ne prenant pas en compte ces éléments, l'application du modèle présenté se restreint à des cellules de haute qualité telle que les cellules en GaAs d'Alta Devices Inc. C'est-à-dire des cellules dont les courants de fuites et la résistance interne entre leurs jonctions et les électrodes sont très faibles. Il serait alors possible d'inclure d'autres types de cellules dont les paramètres électriques sont moins avantageux, par exemple les cellules en silicium

monocristallin ou amorphe grâce à des modèles tels que celui de Brano et coll. et par d'autres.

Cependant, l'orientation de ces travaux est avant tout d'obtenir une méthode complète d'évaluation de l'énergie récupérable dans des environnements des bureaux. Le but est qu'elle puisse être mise en œuvre relativement facilement et avec succès avant de tenter d'optimiser chaque bloc qui la constitue.

Dans ce cadre, un des caractères limitants dans l'obtention de ces résultats est l'utilisation du spectromètre compact choisi pour l'observation de l'environnement lumineux. En effet, malgré des moyens de compensation de température, ce type d'appareil nécessite d'être calibrés de manière régulière. Pour 24 heures de mesures sans recalibration, ce type d'instrument peut entraîner une augmentation des erreurs de calcul du modèle. Cela s'ajoute à sa complexité d'utilisation et de traitement des données qui rendent la méthode présentée difficilement accessible à un utilisateur non familier de ce type d'appareil de mesure.

En tenant compte de cette contrainte et du coût important du dispositif, il a été jugé nécessaire de développer en priorité un instrument de mesure alternatif au spectromètre. Cet outil doit permettre de réaliser des mesures sur de longues périodes, sans nécessiter que l'utilisateur ait à intervenir et que le coût de ses composants et de sa fabrication soient inférieurs au coût d'un spectromètre dont le prix se situe entre 2000 € et 3000 € pour les modèles compacts.

Cela va non seulement dans le sens d'un système d'évaluation de l'énergie récupérable moins contraignant, moins coûteux et plus simple à utiliser, mais également plus fiable en général. En effet, en rendant possible d'effectuer des observations de plus longues durées, il est ainsi possible de mieux évaluer l'énergie réellement disponible. Le mieux étant de pouvoir l'évaluer sur un cycle annuel pour prendre en compte les variations saisonnières qu'un spectromètre rendrait très laborieux à évaluer.

Dans ce but, le Chapitre 3 aborde la méthode de l'évaluation de l'énergie récupérable, qui vient d'être présentée, sous l'angle d'une méthode à bas coût, faible résolution spectrale, facilement reproductible en grand nombre et qui arrive à établir de façon fiable l'énergie lumineuse récupérable en intérieur. Y est décrite la première étape d'un système qui vise à remplacer le spectromètre nécessaire au modèle de calcul. Les

avantages et contraintes qu'implique le développement et l'utilisation d'un tel outil et les compromis que celui-ci impose sont également discutés.

Chapitre 3

Développement d'un moyen d'analyse à faible coût

3.1 Développement d'un moyen d'analyse à bas coût	72
3.1.1 Composition du système d'analyse.....	73
3.1.2 Réalisation compacte du système d'analyse	75
3.1.3 Acquisition des observations	76
3.2 Classification des sources de lumière.....	78
3.2.1 Entraînement des classifieurs.....	82
3.2.2 Généralisation des classifieurs.....	96
3.2.3 Évaluation en environnement lumineux réel	98
3.2.4 Contraintes et limites des capteurs commerciaux	104
3.3 Conclusion du chapitre.....	105

Pour proposer une alternative aux contraintes qui imposent l'utilisation du spectromètre présenté dans le chapitre précédent, deux approches sont possibles.

La première est d'utiliser un spectromètre plus performant, plus précis pour une gamme de longueurs d'onde plus large et des périodes d'observations plus longues. Cela implique cependant un investissement et un encombrement plus importants. De même, l'utilisation d'un appareil qui fournit un grand volume d'information reste contraignante pour notre cas d'usage. Sans compter qu'un tel dispositif ne peut pas être déployé dans un environnement pour une longue période sans avoir à prendre toutes les précautions nécessaires à assurer son intégrité et sa protection.

Une seconde approche consiste à employer des appareils à plus faible coût et à plus faible résolution spectrale. Le volume de données réduit et le coût suffisamment faible pour en utiliser plusieurs donnent alors un instrument de mesure moins contraignant pour l'évaluation de l'énergie récupérable. Il serait ainsi envisageable d'effectuer des mesures en parallèle à plusieurs endroits sur de longues périodes sans nécessiter d'interventions régulières de la part de l'utilisateur.

Aux vues de ces avantages, cette seconde méthode a été choisie pour la suite des travaux.

Pour tirer profit des avantages d'un moyen d'analyse de l'environnement lumineux à bas coût et à faible niveau d'information, et obtenir des résultats similaires à ceux présentés dans le chapitre précédent, un traitement des données supplémentaire doit être employé.

Grâce à des méthodes, développées dans ce chapitre, de classification des données récoltées par un tel dispositif et de reconstruction de spectres, il est possible de reconnaître le type d'environnement lumineux et d'en reconstituer le spectre lumineux. À partir de cela il est ensuite possible d'évaluer l'énergie disponible dans l'environnement lumineux observé en utilisant le modèle de calcul du chapitre précédent.

L'avantage de ce type d'appareil est bien entendu d'avoir un coût réduit, mais également une quantité de données à traiter significativement plus importante. Ces deux caractéristiques permettent d'envisager la possibilité d'utiliser une multitude de ces systèmes et ainsi réaliser en parallèle des analyses dans différents environnements, tout en limitant la quantité d'information générée. Ainsi l'analyse des environnements doit pouvoir être réalisée de manière plus simple et plus rapide. Ce type de solution offrirait

de nouvelles perspectives pour l'étude et le développement d'appareils connectés visant à être autonomes.

Bien que cette approche semble très prometteuse dans notre cas d'usage, son intégration dans les travaux présentés dans le Chapitre 2 reste cependant moins directe qu'avec l'utilisation d'un spectromètre. En effet, de faibles niveaux de données ne peuvent pas remplacer directement la mesure détaillée d'un spectre. Ces données nécessitent de passer par deux étapes d'analyse. La première est celle décrite dans ce chapitre, la reconnaissance du type de source lumineuse. Ensuite, pour la deuxième et dernière étape, les données de faible niveau d'information serviront à reconstruire un spectre utilisable par le modèle décrit dans le Chapitre 2. Les détails de cette étape finale sont décrits dans le Chapitre 4 du manuscrit.

C'est donc la première étape d'analyse de l'environnement lumineux que les sections suivantes développent.

Pour commencer, ce sont les éléments constitutifs du système d'analyse à bas coût qui sont présentés. Puis le développement et assemblage de ce dispositif sont décrits. Enfin, la méthode utilisée pour reconnaître le type de source lumineuse présente dans l'environnement est détaillée puis testée pour évaluer ses performances.

3.1 Développement d'un moyen d'analyse à bas coût

Pour arriver à remplacer le spectromètre, un prototype de système qui embarque les capteurs nécessaires à l'analyse de l'environnement lumineux est développé.

La méthode qui est appliquée ici repose sur celles développées dans les publications de Sarik et coll. [70] qui propose un système de mesure, appelé « LightBox », qui a également été mis en œuvre par Ma et coll. [84], [101]. La première étape est d'être capable de classer les sources de lumière observées selon leur nature. La section suivante s'intéresse à l'application de cette méthode d'observation de l'environnement lumineux réel ainsi que l'utilisation de la classification pour discriminer la nature du rayonnement lumineux.

3.1.1 Composition du système d'analyse

Les capteurs utilisés pour analyser l'environnement lumineux sont deux capteurs commerciaux largement disponibles commercialement. Le premier, un capteur d'intensité lumineuse (luxmètre), le TSL2561 de TAOS [102], embarque deux photodiodes. L'une des photodiodes est sensible aux longueurs d'onde de 300 nm à 1000 nm tandis que l'autre est sensible aux rayonnements rouges et proches infrarouges (800-1100 nm) comme le montre la Figure 3.1 (a). Ce capteur, grâce à ces deux photodiodes, permet d'obtenir une valeur de l'intensité lumineuse en lux. Le second est un capteur de couleurs (RGBmètre) et consiste en une matrice de 3 types de photodiodes. Comme l'illustre la Figure 3.1 (b), chacun de ces trois types de photodiodes vise à reproduire la sensibilité des trois types cônes de l'œil humain (courbes en pointillé nommées « 1931 STD »). Chacune de ces photodiodes est donc sensible à une gamme différente de longueurs d'ondes dans le domaine du visible (de 380 nm à 780 nm). Les photodiodes de cette matrice permettent de distinguer les proportions de couleur rouge, verte ou bleue, contenue dans le spectre de la lumière observée. Un des intérêts d'utiliser ce type de capteurs est leur coût, inférieur à 5 € pour les obtenir tous les deux. Ce prix peut tomber à moins de 2,50 € si l'on envisage la fabrication en masse.

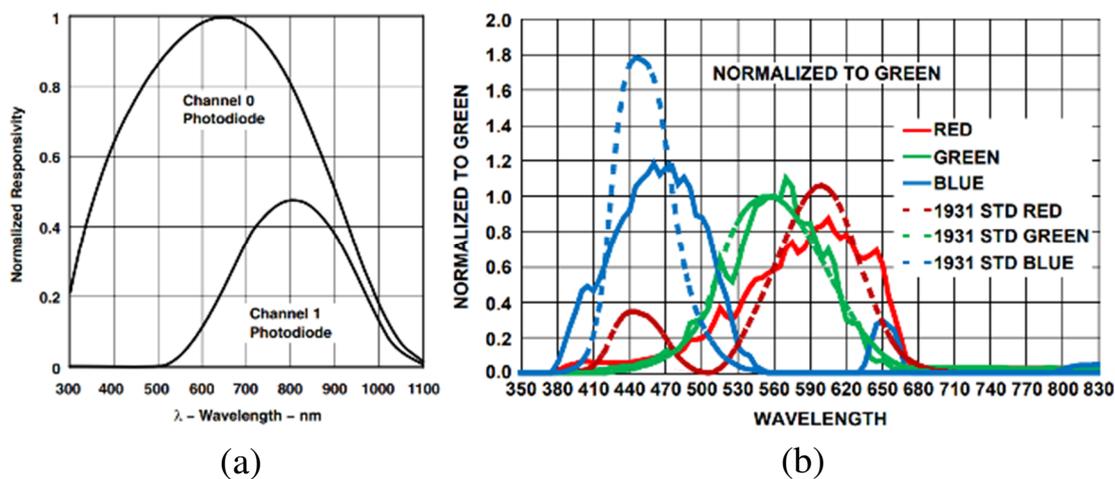


Figure 3.1 : Réponse spectrale des capteurs utilisés pour le système d'analyse. (a) Réponse spectrale du TSL2561 de TAOS [102] (b) Réponse spectrale du capteur ISL29125 de RENESAS [103].

De ces deux capteurs sont récupérées six valeurs :

- la valeur de la photodiode large bande (*BB*),
- la valeur de la photodiode centrée sur les proches infrarouges (*IR*)

- l'intensité lumineuse, qui est déduite des deux valeurs précédentes, est donnée en lux (*LUX*).
- la valeur des photodiodes rouges (*R*)
- la valeur des photodiodes vertes (*V*)
- la valeur des photodiodes bleues (*B*).

L'objectif de notre méthode est de pouvoir déduire, à partir de ces six valeurs, l'irradiance et le spectre lumineux présents dans l'environnement observé par les capteurs.

Afin d'y parvenir, un système d'acquisition de ces valeurs est tout d'abord créé (voir la Figure 3.2). Une fois les données récupérées, celles-ci sont stockées sur une base de données mise à disposition, depuis un serveur, pour le système qui sera chargé de reconnaître le type de source lumineuse observé.

De manière à récupérer les mesures de ces deux capteurs, un microcontrôleur semblable à ceux utilisés pour le prototype de la section 2.2.1 est mis en œuvre. Ce microcontrôleur communique grâce au protocole I²C, utilisé par les capteurs, et peut ainsi leur ordonner d'effectuer des mesures pour les envoyer ensuite par wifi dans une table spécifique de la base de données hébergée par le serveur.

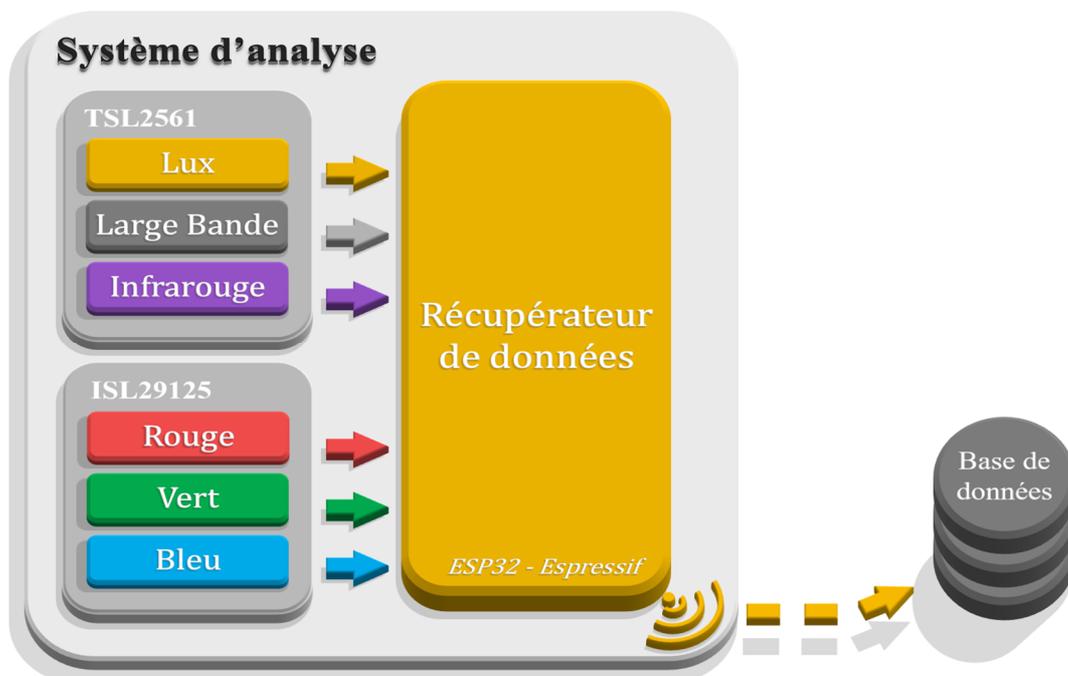


Figure 3.2 : Schéma du système d'analyse embarquant les capteurs TSL2561 et ISL29125 dont les données sont récupérées par un microcontrôleur ESP32 d'ESPRESSIF, utilisé par la carte HUZZAH32 d'Adafruit. Ces données sont ensuite transférées par wifi sur la base de données hébergée par le serveur.

3.1.2 Réalisation compacte du système d'analyse

Un circuit imprimé spécialement créé pour connecter l'ensemble des éléments qui composent ce dispositif de mesures est présenté dans la Figure 3.3. Il a pour intérêt de rendre le dispositif de mesure compacte, de pouvoir suivre son niveau de batterie¹ et ainsi prévenir l'utilisateur en cas de batterie faible. Enfin, il donne la possibilité de choisir entre deux modes de fonctionnement.

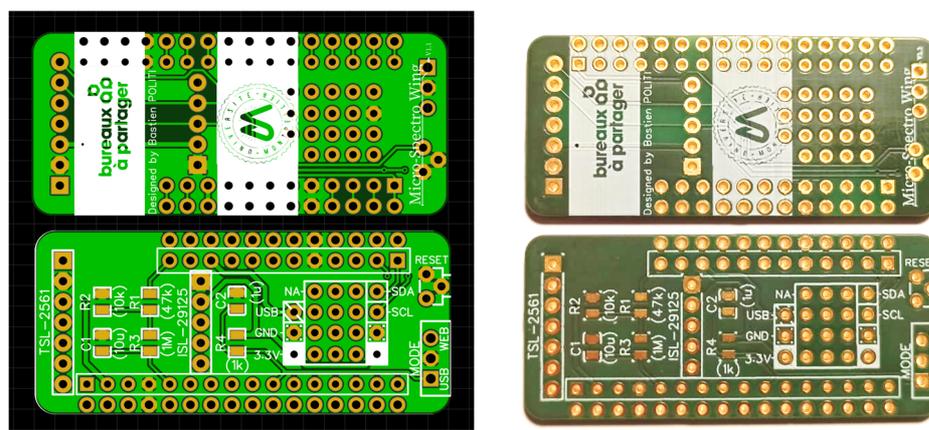


Figure 3.3 : À gauche, vue de dessous et de dessus du circuit imprimé réalisé par ordinateur. À droite, vue de dessous et de dessus du circuit imprimé une fois fabriquée.

L'utilisation du mode « USB » sert principalement à constituer les jeux de données nécessaires à la méthode de reconnaissance du type de source lumineuse. Dans ce mode de fonctionnement, l'acquisition d'observations est réalisée manuellement et l'utilisateur renseigne pour chaque acquisition le type de source lumineuse observée.

Ce premier mode est créé dans le but de constituer une base d'observations utile pour la méthode de reconnaissance des sources lumineuses qui est présentée dans la section suivante.

Le mode « WEB » permet quant à lui de faire fonctionner le système de manière automatique. Ce mode a pour but de réaliser des observations sur de longues périodes sans requérir d'intervention de la part de l'utilisateur hormis pour le lancement ou l'arrêt des mesures. Ce mode d'enregistrement est créé pour être utilisé dans le cadre du Chapitre 4 et correspond au mode final de fonctionnement de ce dispositif.

¹ Ce moyen de mesure peut être déployé avec ou sans batterie pour l'alimenter. Il peut être directement relié à une alimentation sur secteur ou par un ordinateur grâce à une connectique USB.

3.1.3 Acquisition des observations

Une fois l'ensemble des composants du système d'analyse connecté grâce à cette carte (voir la Figure 3.4), ce dispositif compact de mesures (dimensions : $2,3 \times 5,3 \times 2,9 \text{ cm}^3$) peut être utilisé grâce à une interface conçue pour observer, récupérer et enregistrer les données mesurées.

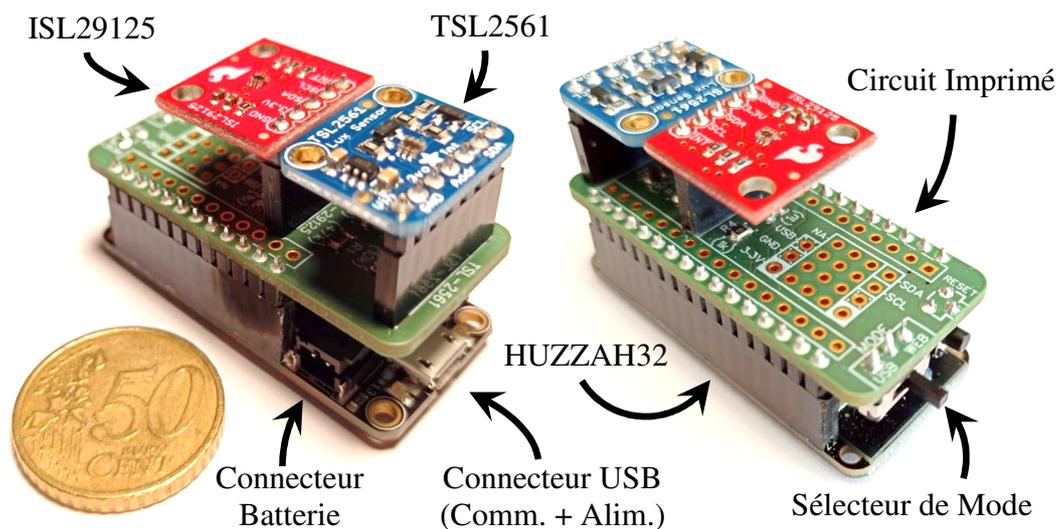


Figure 3.4 : Instrument de mesure compacte une fois assemblé.

Cette interface, présentée par la Figure 3.5, permet de créer des bases de données qui regroupent les observations faites pour différents lieux et pour différents types de sources observés.

L'utilisateur de cette interface peut créer des lieux d'observations qui correspondent à des emplacements pour lesquels l'évaluation de l'énergie récupérable est souhaitée. Pour chaque source qu'il souhaite observer, il suffit de créer une nouvelle source pour cet environnement et d'y inclure de nouvelles mesures.

Pour réaliser ces mesures et les enregistrer, il suffit de connecter par USB à un ordinateur équipé de cette interface, le dispositif de mesure développé et de lancer des nouvelles mesures. Le spectromètre peut également être connecté à l'interface pour que des spectres de références des sources de lumière observées puissent également être enregistrés. L'utilité de ces spectres de références est décrite dans le Chapitre 4 qui s'occupe de présenter la méthode de reconstruction des spectres.

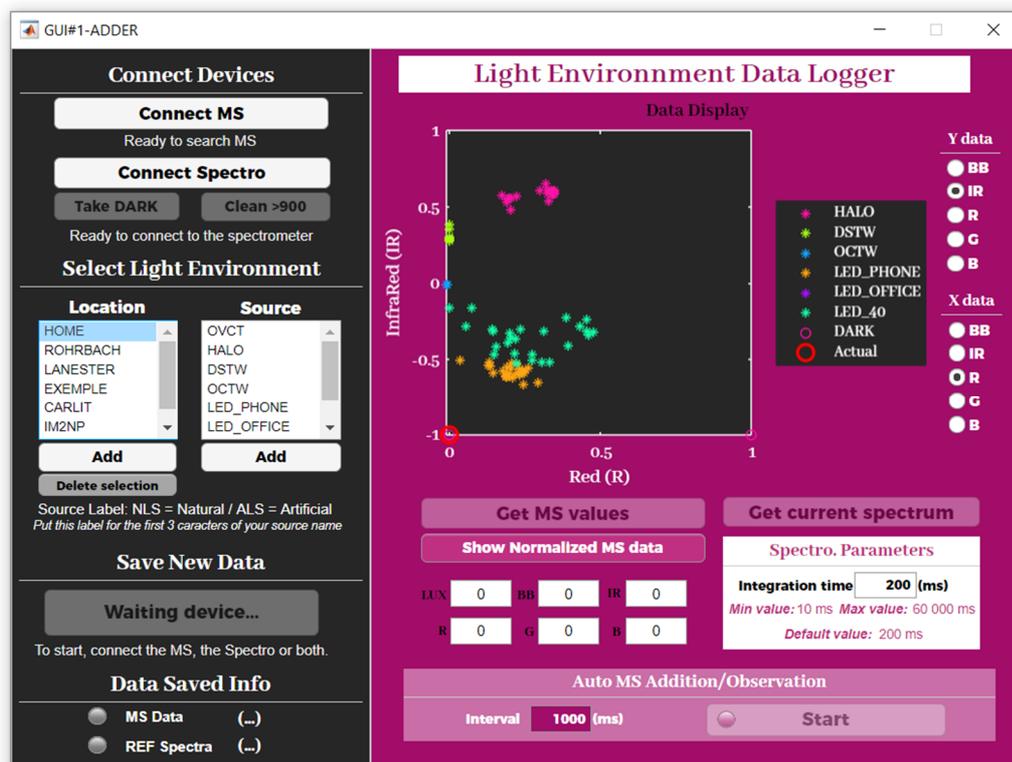


Figure 3.5 : Interface graphique utilisée pour récolter et sauvegarder les données d'observations.

Pour se faire une idée de ce à quoi ressemblent les données de nos capteurs, la Figure 3.6 montre un exemple de mesures pour trois sources de lumière distinctes : une lampe à tube fluorescent, une lampe à LED et la lumière naturelle pour d'un ciel couvert passant à travers une vitre. En normalisant les données par le capteur vert, on observe aisément les différences de source lumineuse dans ces quasi-spectres.

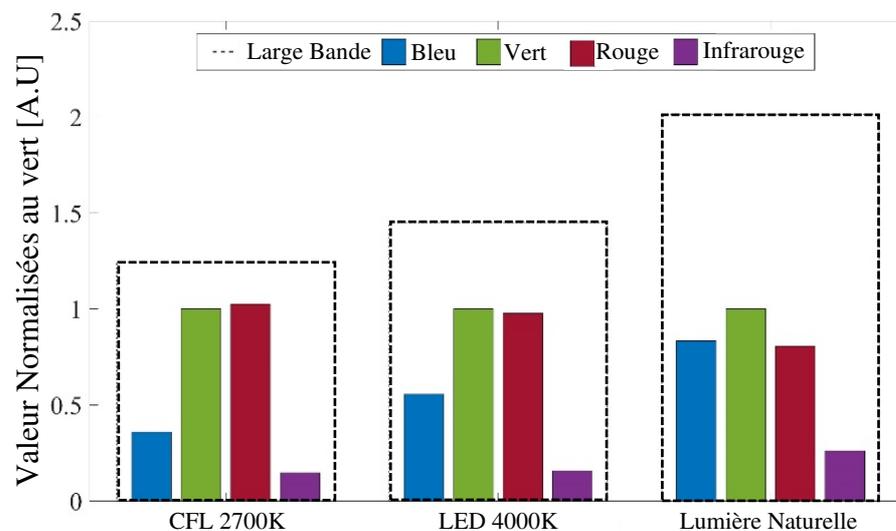


Figure 3.6 : Exemples de 3 pseudospectres mesurés par les capteurs du système d'analyse. Les différences de mesures entre ces trois sources de lumière sont sensibles.

La Figure 3.7 montre l'évolution des 6 données au cours d'une journée. La récupération des données se fait directement sur le site web hébergé par le serveur.

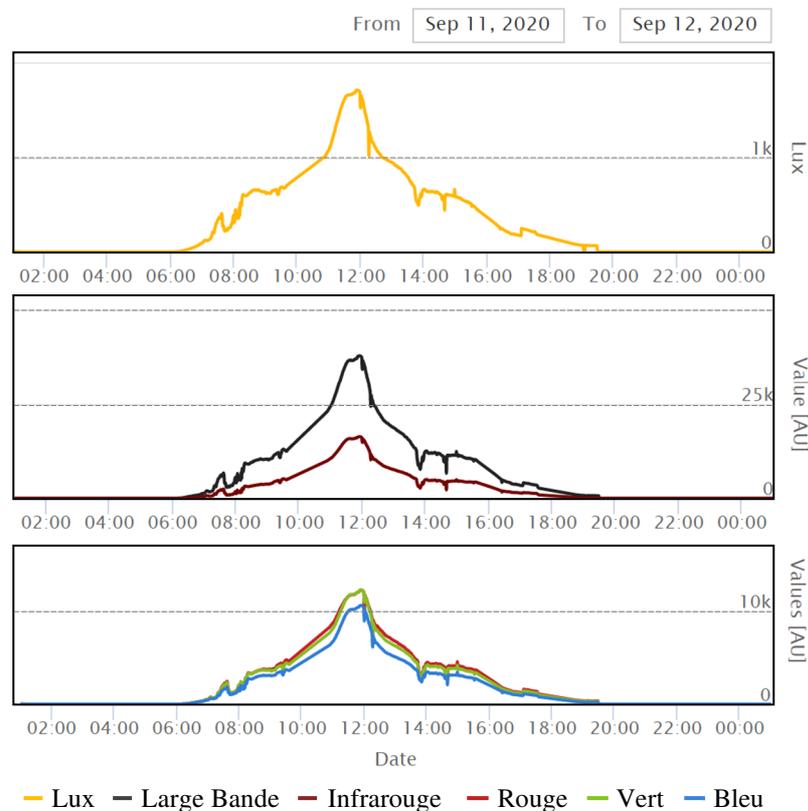


Figure 3.7 : Données affichées sur le site web (*bastienpoliti.fr*) hébergé par le serveur dont la base de données stocke les mesures du système d'analyse.

À partir de ces données récupérées d'environnements lumineux et pour être capable d'en reconstituer le spectre lumineux, une première étape est de reconnaître le type de source de lumière observé. Pour cela des méthodes de classifications peuvent être mises en application.

3.2 Classification des sources de lumière

Pour différencier les sources de lumière observées grâce aux données expérimentales capturées par le système décrit dans la section précédente, la technique de la classification par apprentissage supervisé est choisie.

Cette méthode s'apparente à celle utilisée dans le domaine de la télédétection (ou détection à distance), et plus particulièrement à l'étude satellitaire (LANDSAT par exemple) ou aérienne des surfaces terrestres qui, grâce à des capteurs multispectraux ou hyperspectraux, peut permettre d'obtenir une quantité importante d'informations sur

les zones observées. Dans ce cas, la méthode de classification consiste à observer les différences dans les bandes spectrales obtenues avec ces mêmes types de photodiodes, le plus souvent représentées sous forme de pixels d'une image. Les différences peuvent servir à la classification des zones observées, avec des applications courantes dans l'évaluation des dommages environnementaux, la supervision de l'utilisation des terres, l'urbanisme, l'évaluation des sols et la surveillance du rendement des cultures [104].

Ce processus de classification passe par trois étapes. Chacune de ces étapes permet d'établir quelle méthode de classification et quel jeu de données permettent d'obtenir le classifieur le plus performant. La Figure 3.10 résume ces trois étapes.

La première de ces étapes est l'entraînement. Cette étape consiste à fournir un jeu de données dans lequel chaque observation est associée à une classe comme le montre la Figure 3.8.

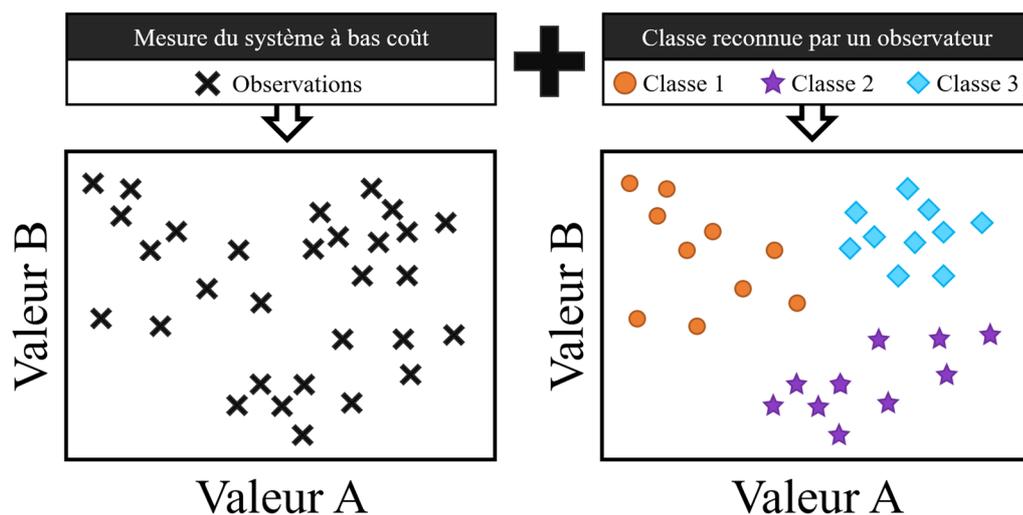


Figure 3.8: Exemple d'informations nécessaires à l'entraînement d'un classifieur. À gauche les valeurs d'observations et à droite les informations de classes attribuées à chacune des observations par le superviseur (l'utilisateur).

Dans notre cas, les classes correspondent aux différents types de sources de lumière observés dans un environnement lumineux. Pour constituer ce jeu de données, l'interface graphique présentée dans la Figure 3.5 est utilisée. Les observations sont récoltées à partir de notre système d'analyse à faible coût et l'utilisateur renseigne la classe (supervision) à laquelle correspond chaque observation en sélectionnant une classe de source lumineuse qu'il a déjà pu créer pour cet environnement, ou bien en créer une nouvelle.

Comme cela a pu être mentionné précédemment, une mesure spectrométrique est réalisée pour chaque classe de source lumineuse pour avoir les spectres de référence utiles à la méthode de reconstruction des spectres développée dans le Chapitre 4.

Une fois le jeu de données créé, l'entraînement de classifieurs peut commencer. Il s'agit alors d'appliquer des méthodes de classifications qui, à partir de ce jeu de données, vont tenter d'établir des équations de séparation qui établissent les frontières entre les différentes classes connues, comme l'illustre la Figure 3.9. De cette manière, un classifieur qui aura été entraîné à partir d'une méthode de classifications performantes sera capable de classer correctement de nouvelles données qui lui seraient soumises.

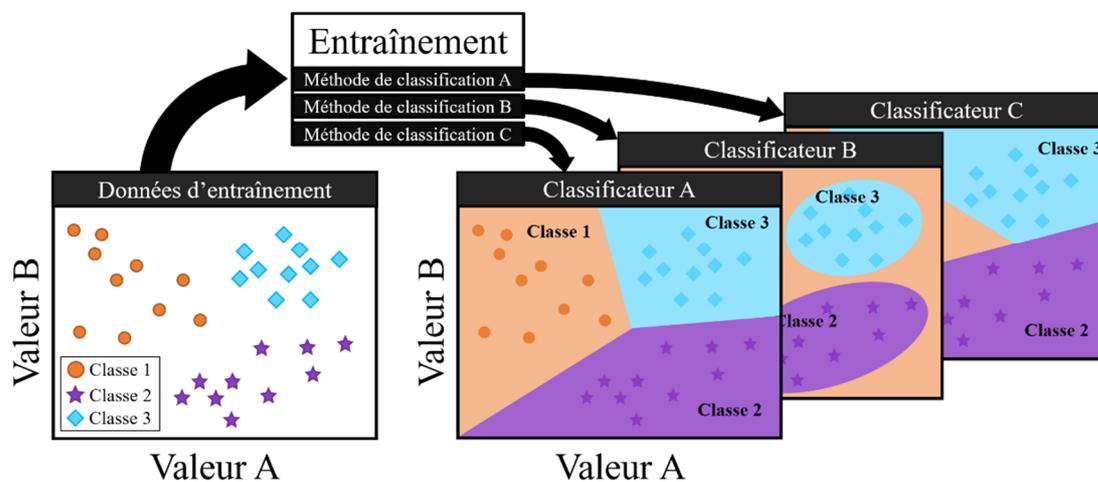


Figure 3.9 : Processus d'entraînement de classifieur à partir du même jeu de données, mais de différentes méthodes de classification. Cela donne des classifieurs avec des frontières entre classes qui peuvent être très différentes.

En plus des différentes méthodes de classification utilisables, il est également intéressant de tester différentes configurations de données. C'est-à-dire, étudier s'il est possible d'entraîner des classifieurs performants en utilisant seulement une partie des 6 données collectées lors des observations. L'intérêt de cela serait d'établir si un classifieur peut être performant et traiter moins de données. Ainsi, l'énergie et le temps nécessaire à l'entraînement et à l'utilisation d'un classifieur pourraient être réduits.

En réduisant un maximum l'énergie nécessaire à l'utilisation d'un classifieur, il serait envisageable de l'utiliser directement sur notre système de mesure, comme cela a été démontré dans les travaux de Micheals et coll. [105], et même d'entraîner un classifieur de manière embarquée.

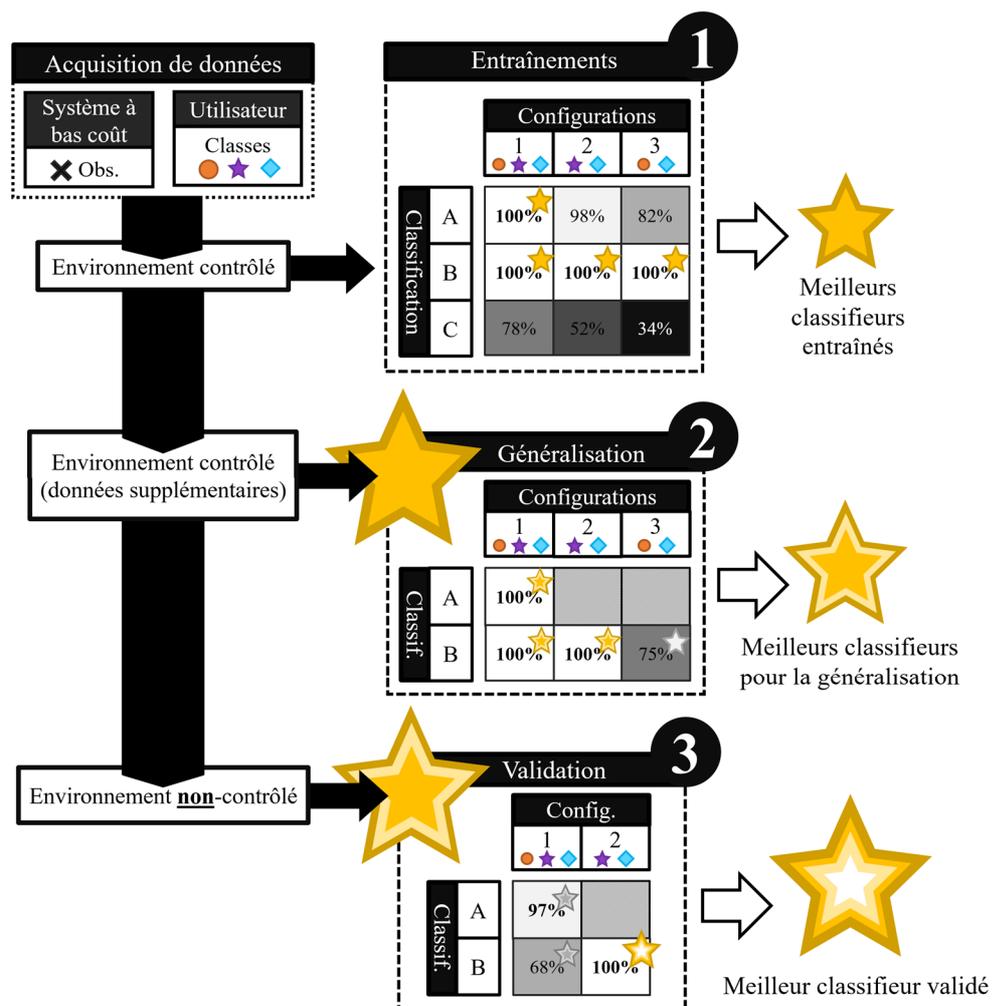


Figure 3.10 : Schéma des différentes étapes du processus utilisé pour obtenir un classifieur performant.

Pour en revenir à l'entraînement, de manière à évaluer les performances d'un classifieur, son entraînement est réalisé selon la méthode de validation croisée à K-blocs. C'est-à-dire que le jeu de données est divisé en un nombre K de blocs de données, dont le nombre K-1 correspond au nombre de blocs utilisés pour l'apprentissage du classifieur. Le dernier bloc sert alors à tester le classifieur entraîné pour déterminer sa validité. En comparant à chaque fois les résultats de classifications des données de ce bloc avec ceux attendus en théorie, il est donc possible de déterminer son niveau de précision. Cette procédure est alors répétée autant de fois qu'il existe de bloc, en prenant toujours un bloc différent comme bloc de validité. Dans notre cas, la validation croisée est composée de 5 blocs.

Une fois les classifieurs entraînés, ceux ayant obtenu les meilleurs résultats peuvent être choisis pour passer à la deuxième étape, celle de la généralisation. Pour celle-ci, d'autres données similaires à celle fournie pour l'entraînement sont données au classifieur entraîné. Ces données sont relativement similaires à celle d'entraînement,

mais non identiques. Cela permet de vérifier si le classifieur est capable de généraliser sa classification à des données d'un même type sans souffrir de sous-ajustement ou de surajustement.

La dernière étape est celle d'évaluation de la robustesse des classifieurs ayant passé les deux premières étapes. Il s'agit de confronter les classifieurs dont la capacité à généraliser est satisfaisante à des données non idéales. C'est-à-dire des données dont les valeurs vont être plus marquées par des différences avec celles utilisées dans les deux étapes précédentes.

3.2.1 Entraînement des classifieurs

Plusieurs classifieurs peuvent être utilisés pour classer ce type de données. Le Tableau 3.1 recense les 6 grands types de classifications utilisés. Chacun de ces types de classification comprend différentes variantes de classification, ce qui donne un total de 24 méthodes de classifications.

Type de Classification	Classification
Arbres de Décision (<i>Decision Trees</i>)	Fine Moyenne Grossière
Discrimination (<i>Discriminant</i>)	Linéaire Quadratique
Bayésienne Naïve (<i>Naive Bayes</i>)	Gaussienne Par Noyau (Kernel)
Machine à Vecteurs de Support (<i>Support Vector Machine</i> ou SVM)	Linéaire Quadratique Cubique Gaussienne Fine Gaussienne Moyenne Gaussien Grossière
K Plus Proche Voisin (<i>K-nearest neighbor</i> ou KNN)	Fine Moyenne Grossière Cubique Cosinus Pondérée
Ensembles	Arbres boosted Arbres Bagged Discrimination de sous-espaces KNN de sous-espaces Arbres RUSBoosted

Tableau 3.1 : Différentes méthodes de classifications générales utilisées et variantes de classification qu'elles englobent.

Ces différentes méthodes offrent une diversité d'approches dans l'établissement des équations de séparations des classes de données. Cela donne donc la possibilité d'évaluer lesquelles parmi elles sont les plus adaptées à nos données. Pour réaliser ces tests, l'application « Classification Learner » développée par MATLAB est utilisée. Selon le jeu de données et le type de classifieur, le temps d'entraînement peut être conséquent. Cet outil permet de tester relativement rapidement de nombreuses méthodes de classification, tout en pouvant faire varier la configuration des données.

Comme cela a déjà pu être évoqué précédemment, l'entraînement des classifieurs peut se faire à partir des 6 données obtenues avec le système d'analyse, mais également à partir d'une sélection réduite des caractéristiques mesurées. Le Tableau 3.2 liste les combinaisons étudiées afin de déterminer si l'une de ces configurations est plus favorable que les autres pour l'obtention d'une classification correcte.

Configuration	Classifieur
<i>A</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Lux <input checked="" type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>B</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input checked="" type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>C</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Lux <input checked="" type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> B
<i>D</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>E</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input checked="" type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> B
<i>F</i>	<input checked="" type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>G</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input checked="" type="checkbox"/> BB <input type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>H</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B
<i>I</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input checked="" type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> B
<i>J</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input type="checkbox"/> R <input checked="" type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> B
<i>K</i>	<input type="checkbox"/> Lux <input type="checkbox"/> BB <input checked="" type="checkbox"/> IR <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> V <input checked="" type="checkbox"/> B

Tableau 3.2 : Différentes combinaisons de valeurs mesurées, utilisées pour l'entraînement des classifieurs

Finalement, l'association de chaque méthode de classification avec chaque configuration de valeurs donne un total de 264 classifieurs à entraîner.

a. *Entraînement avec données brutes*

En constituant un jeu de données brutes d'observations réalisées sous différentes monosources de lumière, il est possible de faire un premier entraînement de classification avec cet utilitaire. Le jeu de données a été constitué sous 7 ambiances lumineuses différentes : sous des lampes fluorescentes compactes (CFL) de 2700K et 6500K, sous des lampes à LED (à phosphore) de 3000K et 4000K, sous lumière naturelle passant à travers une vitre par beau temps et temps couvert, et finalement dans l'obscurité. En faisant varier les intensités lumineuses, un jeu de 126 mesures décrites dans le Tableau 3.3 est obtenu.

Classe	Gamme d'intensité lumineuse observée	Nombre d'observations
<i>LED (3000K)</i>	50 – 2000 lux	36
<i>LED (4000K)</i>	100 – 1000 lux	9
<i>CFL (2700K)</i>	50 – 2000 lux	30
<i>CFL (6500K)</i>	75 – 2000 lux	18
<i>Lumière Naturelle à travers vitre</i>	600 – 9200 lux	26
<i>Lumière du ciel couvert à travers vitre</i>	280 – 300 lux	3
<i>Obscurité</i>	0 lux	4

Tableau 3.3 : Différentes combinaisons de valeurs mesurées, utilisées pour l'entraînement des classifieurs

Les entraînements sont répétés à partir de ces 126 mesures et réalisés pour chacun des 24 classifieurs cités précédemment et pour chaque configuration de données du capteur présentées précédemment : depuis la configuration A, pour laquelle l'ensemble des 6 données des capteurs est utilisé, jusqu'aux configurations B à K qui n'en prennent que quelques-unes. Les résultats obtenus pour l'ensemble de classifieurs sont présentés dans la Figure 3.11.

Par exemple, dans la première colonne A, qui prend en compte les 6 données du capteur, se trouve à la 10^e ligne le résultat du classifieur « Cubic SVM », qui a obtenu 96,8 % de classifications correctes. Cela veut dire qu'en employant cette méthode de classification, avec l'ensemble des données disponibles pour ces 126 observations, le classifieur entraîné est capable d'en reconnaître correctement 122. D'autres classifieurs, notamment « Fine KNN », « Weighted KNN » ou encore « Bagged Trees ». Ces premiers résultats sur données brutes sont très encourageants.

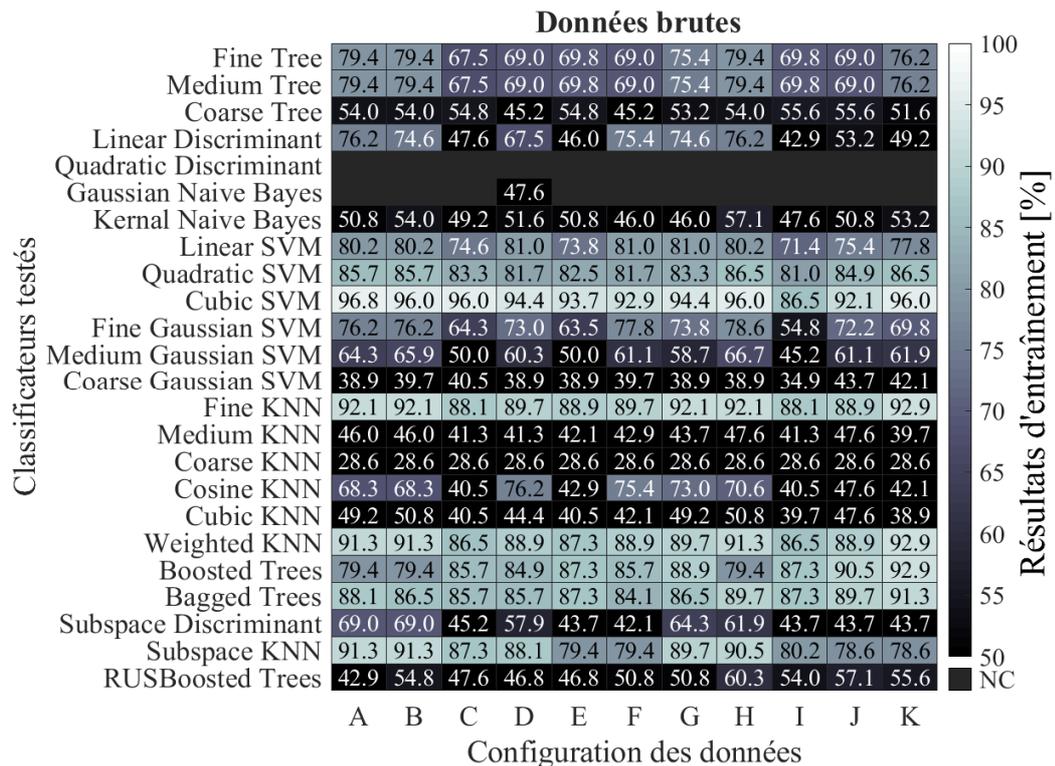


Figure 3.11 : Résultats des entraînements des classifieurs à partir du jeu de données brutes. Le taux de classification correcte de ce jeu de données atteint un maximum de 96,8 % pour la configuration A à laquelle est appliqué un classifieur SVM cubique.

Pour mieux comprendre ces résultats, mais aussi les raisons pour lesquelles certaines méthodes de classification sont plus performantes que les autres, il est nécessaire d'essayer de se représenter la manière dont elles fonctionnent.

Chaque méthode de classification utilise un algorithme différent pour établir les limites qui séparent les observations différentes sources lumineuses. Lors de son entraînement, chaque classifieur va alors utiliser cet algorithme pour déterminer les paramètres des équations qui définissent ces limites (voir la Figure 3.9). Plus ces paramètres seront bien ajustés aux différentes classes existantes, plus le classifieur sera capable de reconnaître correctement la classe des données qui lui sont fournies.

Avant de se représenter ces limites de séparation entre classes des classifieurs, il faut commencer par représenter les données qui leur sont fournies.

Comme le montre la Figure 3.12.a, il est possible de les représenter dans un espace correspondant à deux des valeurs contenues dans chaque observation (Lux, Large Bande, Infrarouge, Rouge, Vert et Bleu). Ainsi, il est possible de voir chaque observation dans ce plan et la classe à laquelle elle appartient. Les valeurs d'Infrarouge et de Rouge sont les valeurs choisies dans cette figure, car elles

grande partie cohérentes avec les données d'entraînement qui sont représentées en surbrillance.

Néanmoins, il est possible de voir que les surfaces de décisions sont pour certaines très étroites. Cela est une des raisons pour lesquelles les classifieurs qui ont ce type de surface de décisions peuvent parfois classer des observations incorrectement.

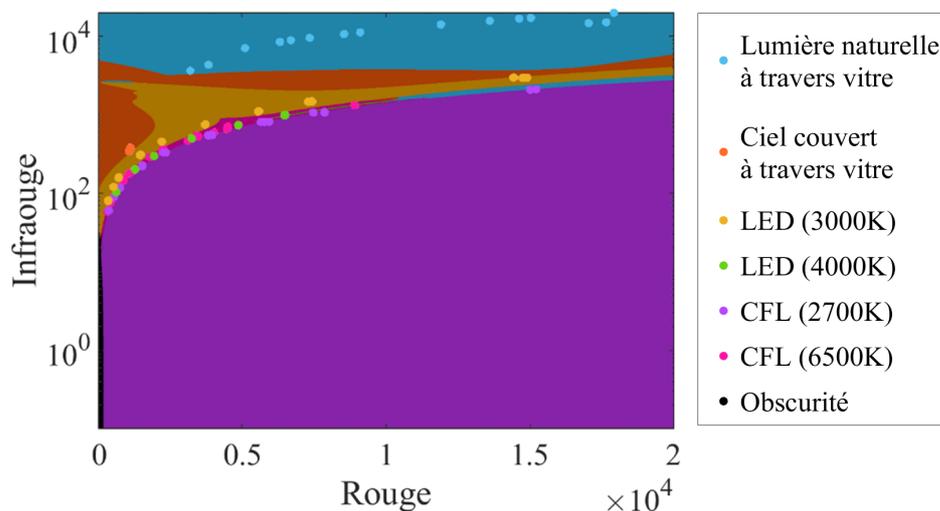


Figure 3.13 : Surface de décision du classificateur « Cubic SVM ». Les points en surbrillance correspondent aux valeurs d'observations et donc le type de classe à reconnaître.

Les surfaces de décision d'autres classifieurs sont données en exemples dans la Figure 3.14. Ces exemples montrent à quel point il est difficile pour les classifieurs d'établir des algorithmes qui fassent correctement la différence entre les sources à partir des échantillons.

Du fait que les classes de sources lumineuses ne sont pas concentrées sur un espace distinct, mais distribuées en intensité sur l'ensemble de leurs caractéristiques, il semble compliqué pour les classifieurs d'établir des algorithmes cohérents. Les faibles niveaux de performance atteints à l'entraînement laissent transparaître un sous-ajustement des classifieurs pour un jeu de données réduit.

Il faut également noter qu'une cause possible des faibles performances d'entraînement peut également venir de la faible quantité de données fournies aux classifieurs. En effet, 126 mesures représentent très peu de mesures dans le cadre de l'apprentissage supervisé. Cela peut également expliquer pourquoi les méthodes de classification par rapport au K plus proche voisin « KNN » présentent d'importantes

irrégularités de classifications comme le montre la Figure 3.14. En effet, ces méthodes se basent sur le principe des K plus proches observations connues. Si ces données sont trop peu nombreuses et trop étalées sur la zone d'évolution d'une classe, le risque de mauvaise classification est important.

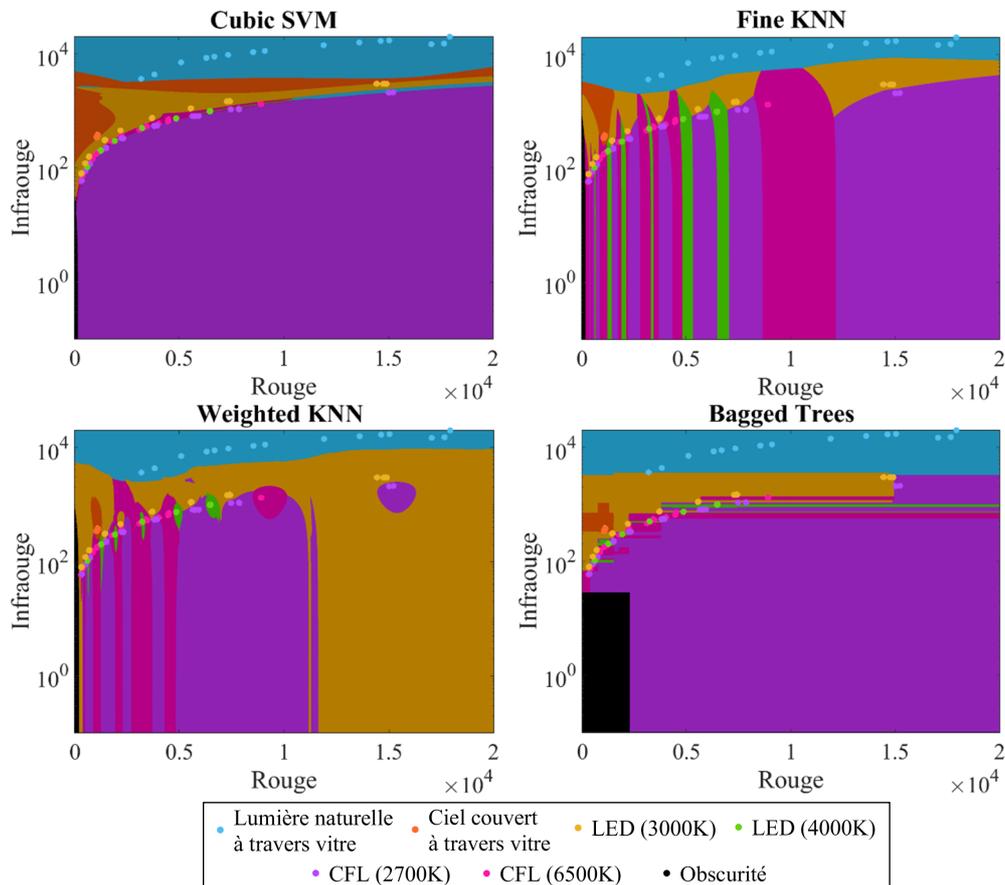


Figure 3.14 : Surfaces de décision des classifieurs entraînés les plus performants.

Néanmoins, une difficulté pour obtenir un volume de données plus important est que celles-ci doivent être distribuées de la façon la plus continue possible pour que les classifieurs puissent établir des algorithmes pertinents sur la gamme d'intensité lumineuse des données. Cela est facilement réalisable pour des sources de lumière artificielle dont les variations sont quasiment binaires. Elles ne nécessitent finalement que peu de mesures pour obtenir leur plage de variations en intensité. À l'inverse, cela n'est pas le cas pour les sources de lumière naturelle. Leurs plages de variation peuvent être très étendues. Elles nécessitent alors un volume important de mesure pour couvrir l'ensemble des intensités observables.

Une autre méthode, ne nécessitant pas l'ajout d'un grand nombre de mesures à l'entraînement des classifieurs, peut également être envisagée. Les paragraphes

suivants présentent cette méthode, appelée « Normalisation de la différence », et qui permet de s'affranchir en grande partie des variations d'intensité lumineuse qui contraignent la classification des sources de lumière.

b. Entraînement avec normalisation des différences

Pour tenter de rendre la classification plus performante, un calcul de la normalisation de la différence est appliqué. De même que le principe de classification supervisée s'apparente au domaine de la télédétection, une approche de normalisation de la différence est très généralement utilisée pour fournir un index sur la santé de la végétation, le type de sols, etc. Par exemple, le « Normalized Difference Vegetation Index » (NDVI) qui correspond à un index de végétation qui permet d'obtenir des informations sur la santé de la végétation dans une zone étudiée simplement avec cet index [106].

Cette méthode repose sur un simple calcul entre deux valeurs. Il s'agit de diviser la différence des deux valeurs par leur somme, comme le montre l'équation 3.1.

$$ND = \frac{\text{Différence}}{\text{Somme}} = \frac{\text{Variable to normalize} - \text{Normative variable}}{\text{Variable to normalize} + \text{Normative variable}} \quad (3.1)$$

Dans l'exemple de l'index NDVI, il s'agit de normaliser la différence entre la valeur d'infrarouge et la valeur de rouge mesurée pour un pixel. La valeur de rouge est alors soustraite à la valeur d'infrarouge puis le résultat de cette soustraction est divisé par la somme de ces deux valeurs. Pour une végétation en bonne santé, la quantité de rouge observée est faible et la quantité d'infrarouges est importante, dans ce cas l'index est proche de 1. Tandis que dans le cas d'une végétation en mauvaise santé, la part de rouge observé devient significative et celle d'infrarouge chute légèrement ce qui entraîne une chute de l'index proche de 0.

Dans le cas des données obtenues par le système à faible coût, la normalisation de la différence n'est pas appliquée aux valeurs de lux. Étant issue d'un calcul lié aux deux valeurs d'infrarouge et de large bande, cette valeur a comme intérêt principal de donner une valeur d'intensité lumineuse. Sa normalisation ne semble pas pertinente du fait que les valeurs dont elle est issue sont elles-mêmes déjà sujettes à cette normalisation.

Des tests sont réalisés pour établir l'impact que la normalisation de la différence appliquée à nos observations a sur les performances des classificateurs. Dans le cas d'une amélioration des résultats d'entraînement, une comparaison de l'impact des normalisations de la différence est faite.

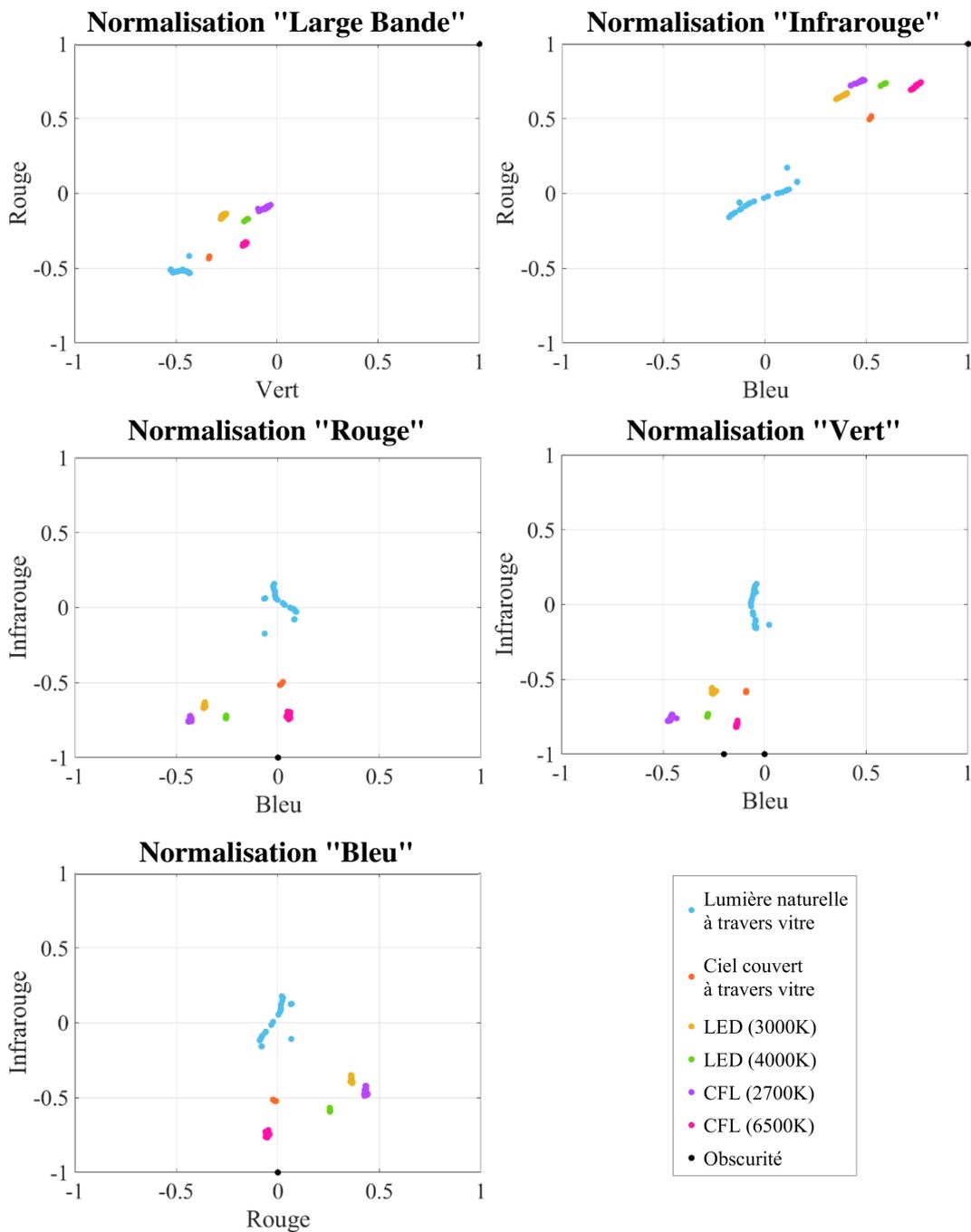


Figure 3.15 : Représentation des observations de sources lumineuses et leurs différentes classes, après avoir appliqué les normalisations de la différence.

De la même manière que la Figure 2.12.a permet de représenter le jeu de données d'entraînement, La Figure 3.15 représente les 5 jeux de données normalisées. Les valeurs choisies pour le plan de représentation graphique varient d'une normalisation

à l'autre. Cela est dû au fait que les valeurs qui servent de norme aux autres valeurs restent toujours égales à 1. Elles ne permettent donc pas la meilleure lisibilité.

Une première chose qu'il est possible de noter sur ces figures est que les classes se distinguent beaucoup mieux les unes des autres que dans la Figure 3.12. En effet, en appliquant la normalisation des différences, les observations des différentes sources se regroupent selon leur classe et ne s'étalent plus en fonction de l'intensité lumineuse.

Pour déterminer quelle valeur parmi celles fournies par le système de mesure est la plus adéquate à être la valeur normative de la différence, l'ensemble des méthodes de classification doivent être appliquées à ces nouveaux jeux de données normalisées.

Concernant les configurations (combinaison de valeurs utilisées pour l'entraînement des classifieurs), un type de configuration supplémentaire est ajouté (L à S) du fait de l'ajout de la normalisation. Ces configurations sont similaires à celles allant de A à H , à la différence que la valeur servant à la normalisation n'est pas incluse. De fait, lors de la normalisation de la différence, la valeur choisie comme valeur normative est alors normée par elle-même et est fatalement nulle. Ces configurations supplémentaires permettent d'établir si oui ou non la prise en compte de la valeur normalisatrice normalisée par elle-même peut avoir un impact sur les performances de classification.

Le nombre de classifieurs à entraîner n'est pas équivalent pour les normalisations réalisées avec les valeurs du capteur TSL2561 (BB et IR) ou du capteur ISL29125 ($R V$ et B). En effet dans certains cas, les configurations de N à S sont similaires aux configurations de C à H . Pour les normalisations par BB ou IR , les configurations O Q R et S sont respectivement identiques aux configurations D F G et H et ne sont donc pas prise en compte.

Les configurations $I J$ et K ont pour but d'évaluer la capacité de classification à partir de la valeur IR du capteur TSL2561 en l'associant à une des valeurs du capteur ISL29125. Ces configurations ne sont donc pas testées dans le cas de la normalisation avec la valeur d'infrarouge (IR) étant donné qu'une seule valeur sur les deux présente ne serait pas nulle. Il en va de même pour les normalisations avec

les valeurs (*R*) (*G*) ou (*B*). Les configurations utilisant la valeur (*IR*) en association avec la valeur utilisée pour la normalisation ne sont pas testées.

Finalement, ce sont 336 classifieurs différents à entraîner avec les données normalisées par la valeur de Large Bande (*BB*) et 242 avec la normalisation (*IR*). Pour les données normalisées par le Rouge (*R*), le Vert (*V*) ou le Bleu (*B*), les configurations *N* et *P* ne sont pas prises en compte, car elles reproduiraient les configurations *C* et *E*. De même, la configuration *I* n'est pas utilisée pour la normalisation (*R*), comme la *J* pour la normalisation (*V*) et la *K* pour la normalisation (*B*). Ce qui donne finalement 384 classifieurs à entraîner pour ces trois jeux de données normalisées.

Afin de tester l'intégralité des méthodes de classifications, avec les différentes configurations de données, et cela pour l'ensemble des jeux de données normalisées, un total de 1752 classifieurs doivent être entraînés.

Pour montrer à quel point la normalisation facilite la tâche des méthodes de classification, la Figure 3.16 suivante présente les surfaces de décisions de plusieurs classifieurs utilisant différentes normalisations.

Le point commun de ces figures est que les frontières entre deux classes de source lumineuse sont établies en zones beaucoup plus facilement discernables pour les méthodes de classification que dans le cas précédent où aucune normalisation des différences n'était appliquée.

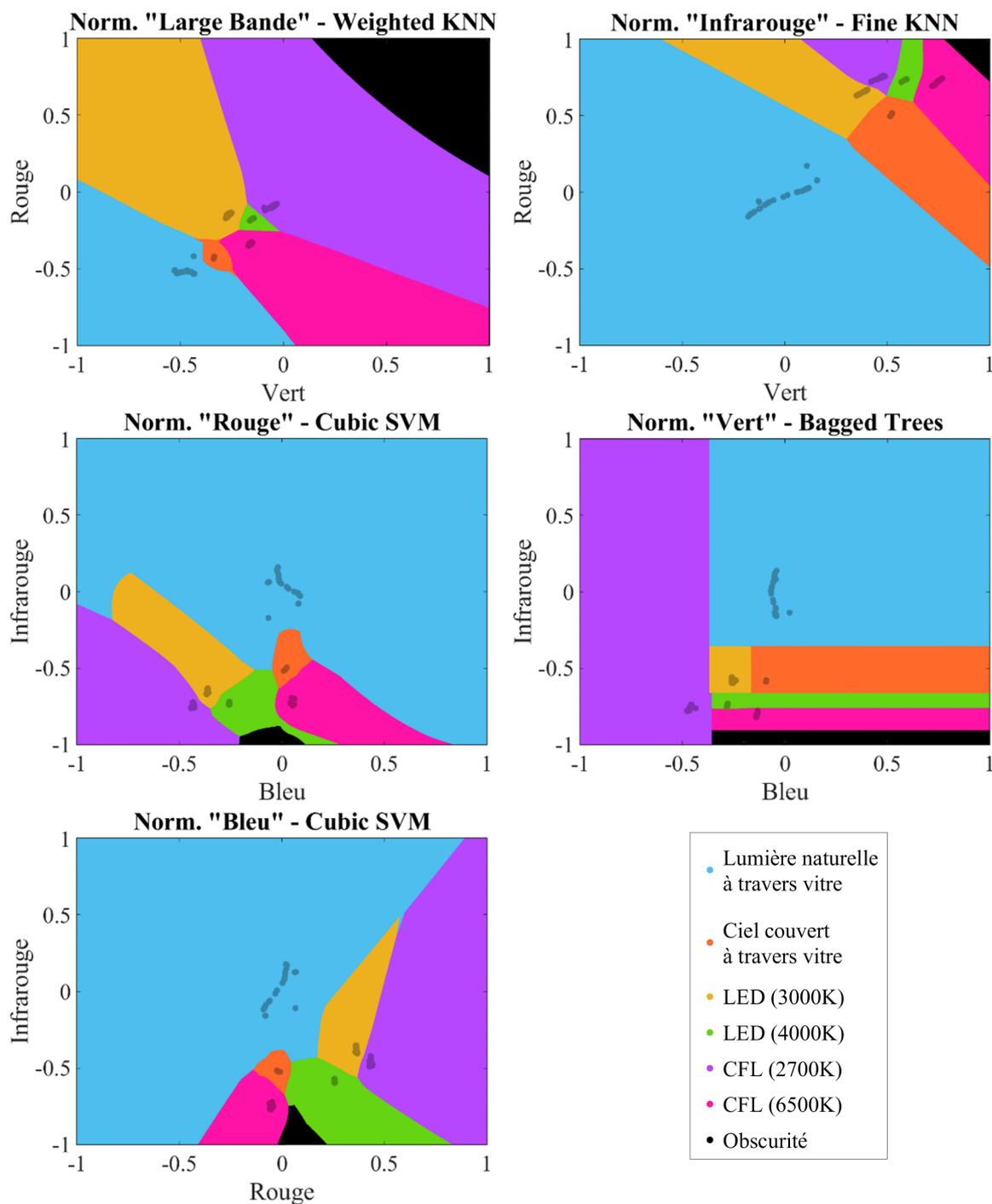


Figure 3.16 : Surface de décision obtenue pour différents classifieurs en appliquant les normalisations de la différence proposées. Les points sombres correspondent aux valeurs des observations disponibles dans les jeux de données.

Finalement, après avoir lancé l'entraînement de ces 1752 classifieurs, il est possible de voir l'impact du calcul de normalisation de la différence dans la Figure 3.17.

Du fait de l'application de la normalisation de la différence, les entraînements de nombreux classifieurs ont permis d'atteindre 100 % de classifications correctes.

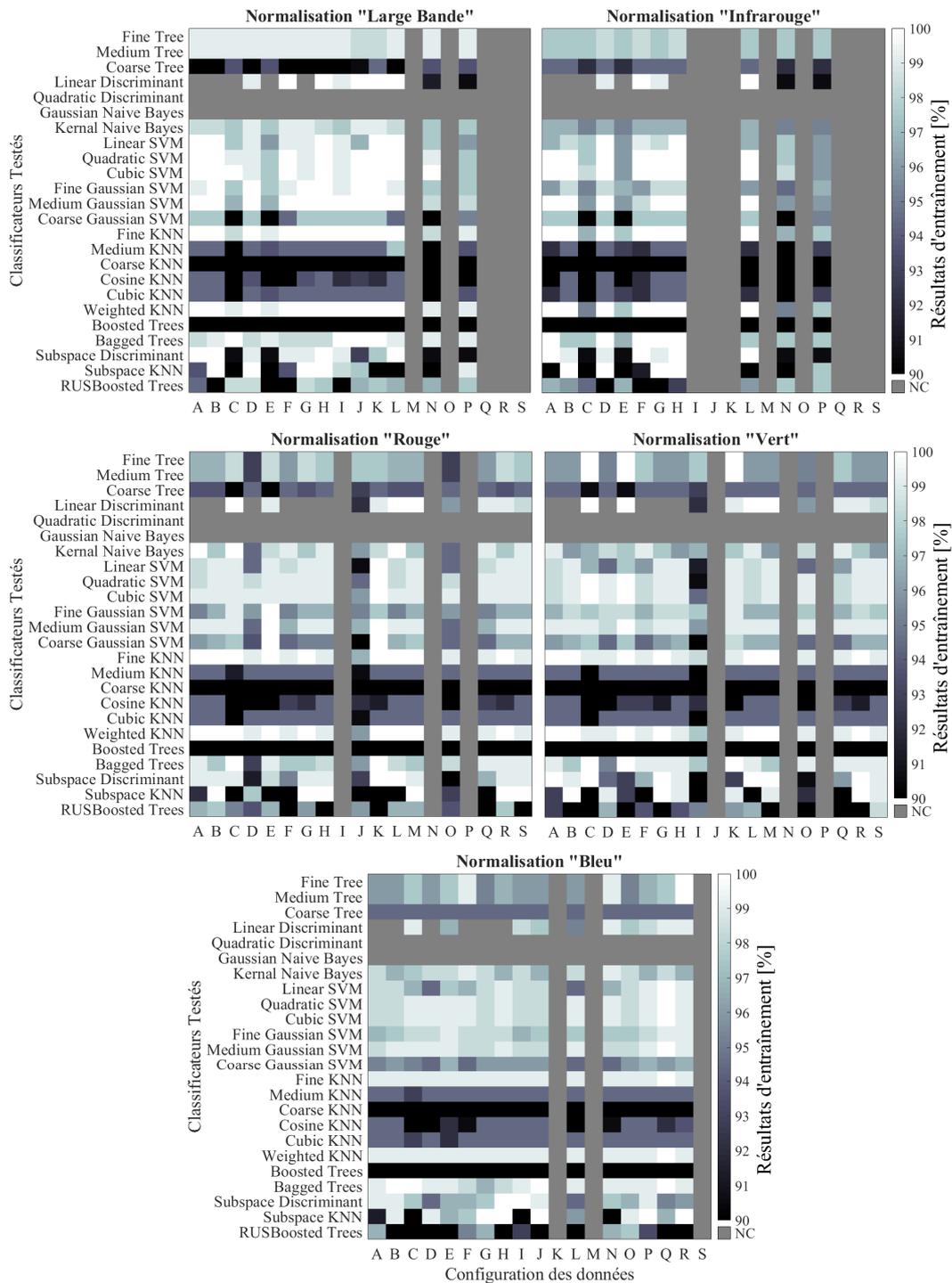


Figure 3.17 : Performances des classifieurs à l'entraînement en utilisant la normalisation des différences par rapport à la valeur de vert.

Dans le cas de la normalisation (BB), sur 336 tests, 77 classifieurs ont obtenu cette performance maximale. Pour la normalisation (IR) (R) (G) et (B), le nombre de classifieurs entraînés qui atteint ce même niveau de performance est respectivement 51/242, 42/384, 41/384 et 56/384. Ce qui donne un total de 267 classificateurs

capables de reconnaître, sans fautes, l'ensemble des données d'entraînement qui leur sont fournies.

En comparant ces résultats à ceux obtenus avec un jeu de données non normalisées (dont aucun entraînement n'a atteint 100 % de réussite), il est possible d'affirmer que l'approche de normalisation de la différence permet l'amélioration des performances de classification. La Figure 3.18 récapitule les associations de classifieurs et de configurations, toutes normalisations confondues, qui ont obtenu 100 % de réussite.

		Configurations des Données																			
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
	Total	24	26	22	13	22	13	22	21	15	11	21	29	14	1	0	0	0	11	2	
Classifieurs	Fine Tree	4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Medium Tree	4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Coarse Tree	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Linear Discriminant	18	0	0	3	0	2	2	0	1	0	1	1	5	3	0	0	0	0	0	0
	Quadratic Discriminant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Gaussian Naive Bayes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Kernel Naive Bayes	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Linear SVM	9	1	1	0	1	0	0	0	2	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	Quadratic SVM	21	2	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	0	0	0	0
	Cubic SVM	23	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2	0	1	0	0	0	0	0
	Fine Gaussian SVM	10	0	1	0	1	2	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Medium Gaussian SVM	22	2	2	1	2	3	1	2	2	2	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0
	Coarse Gaussian SVM	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fine KNN	39	5	5	2	2	3	2	5	2	2	1	2	5	3	0	0	0	0	3	0
	Medium KNN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Coarse KNN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cosine KNN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Cubic KNN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Weighted KNN	39	5	5	2	2	3	2	5	2	2	1	2	5	3	0	0	0	0	3	0
	Boosted Trees	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bagged Trees	21	2	1	4	1	2	1	1	1	2	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0
	Subspace Discriminant	20	4	2	2	0	0	1	1	2	0	0	1	5	2	0	0	0	0	2	0
	Subspace KNN	19	0	5	0	2	0	0	5	4	0	1	0	0	2	0	0	0	0	3	2
	RUSBoosted Trees	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 3.18 : Récapitulatif des classifieurs et des configurations atteignant les 100 % de classification correcte, toutes normalisations confondues.

Ces résultats permettent de préciser le choix des classifieurs dont l'utilisation peut être poursuivie pour la prochaine étape d'évaluation de leurs performances. Les classifieurs ainsi que les configurations n'ayant pas permis d'atteindre une seule fois les 100 % de réussite sont retirés des tests. Par exemple, les méthodes de classification « *Coarse Tree* » et « *Quadratic Discriminant* », ainsi que les configurations *D* et *F* sont mises de côté, car elles ne permettent pas l'obtention de classifieurs entraînés parfaitement performants.

Finalement, seulement 16 méthodes de classification sur 24 sont conservées pour la suite des tests, tandis que seulement 3 configurations de données sur 20 sont retirées.

3.2.2 Généralisation des classifieurs

La deuxième étape est celle dite de généralisation. Elle a pour but d'établir si les classifieurs qui ont passé avec succès la première étape ne sont pas victimes de surajustement. En effet, contrairement à un modèle de classification qui souffre de sous-ajustement, qui n'obtiendra pas de bons résultats à l'entraînement, un classifieur qui obtient 100 % de classements corrects lors de l'entraînement peut être victime de surajustement. Cela veut dire que le classifieur s'est suradapté aux données d'entraînement qui lui ont été fournies et n'est pas capable de reconnaître correctement des données qui ne font pas partie de ces données. Ce classificateur n'est donc pas capable de généraliser sa méthode de classification à d'autres données semblables, mais non identiques à celles utilisées pour son entraînement.

Pour vérifier si les associations de méthodes de classifications et de configurations de données, qui ont été identifiées comme performantes, sont aptes à généraliser leur classification à d'autres données, une nouvelle série de mesures est effectuée.

Cette fois, les mesures réalisées à l'aide du dispositif à faible résolution spectrale sont effectuées dans un environnement lumineux contrôlé. Dans cet environnement, différentes sources lumineuses émettent les unes après les autres leur rayonnement. L'intensité lumineuse est modulée en approchant ou en éloignant les sources des instruments de mesure. Chaque changement de source de lumière est l'occasion de faire des mesures dans l'obscurité. La Figure 3.19 montre l'évolution de la nature de l'environnement lumineux utilisée pour tester la généralisation des classifieurs.

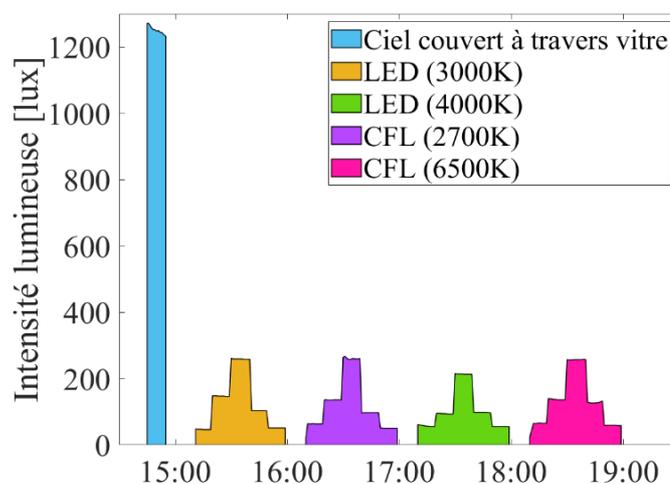


Figure 3.19 : Environnement lumineux contrôlé utilisé pour créer les données de test de généralisation pour les classifieurs ayant passé l'épreuve de l'entraînement.

Le changement des sources lumineuses ou de distance entre elles et l'appareil de mesure ont été minutieusement documentés.

Ainsi, à l'issue des mesures, les données accumulées sont alors fournies aux différents classifieurs de manière à obtenir leurs résultats de classification. En comparant ces résultats aux véritables sources auxquelles était exposé l'appareil de mesure, il est possible d'établir la capacité des classifieurs à généraliser leurs calculs à des données originales. Les résultats de généralisation des classifieurs sont représentés dans la Figure 3.20.

Ces résultats de généralisation montrent que parmi les classifieurs qui atteignent 100 % de classifications correctes à l'entraînement, tous ne sont pas capables de généraliser leur méthode à d'autres données.

En effet, il est possible de constater que malgré un nombre important (77) de classifieurs utilisant la normalisation (*BB*) et qui ont passé avec succès l'étape d'entraînement, seulement 3 d'entre eux obtiennent des résultats équivalents pour cette étape de généralisation. Il en va de même pour la normalisation de la différence avec la valeur d'infrarouge (*IR*) qui obtient des résultats optimums à l'utilisation du classifieur « Linear Discriminant » (2/52).

Parmi les 41 classifieurs qui utilisent la normalisation par rapport au vert (*V*) et qui ont obtenu des résultats de classification parfaits à l'entraînement, seulement 2 ont atteint les 100 % de classifications correctes lors de la généralisation. Pour finir, les normalisations qui permettent le plus grand nombre de réussites à la généralisation sont la normalisation par rapport au rouge (*R*), avec 18 classifieurs sur 42, et celle par rapport au bleu (*B*), avec 17 classifieurs sur 56.

Pour aller plus loin dans ce processus de test des classifieurs, il est nécessaire de passer par l'étape de validation les 42 classifieurs ayant passé avec succès l'étape de généralisation.

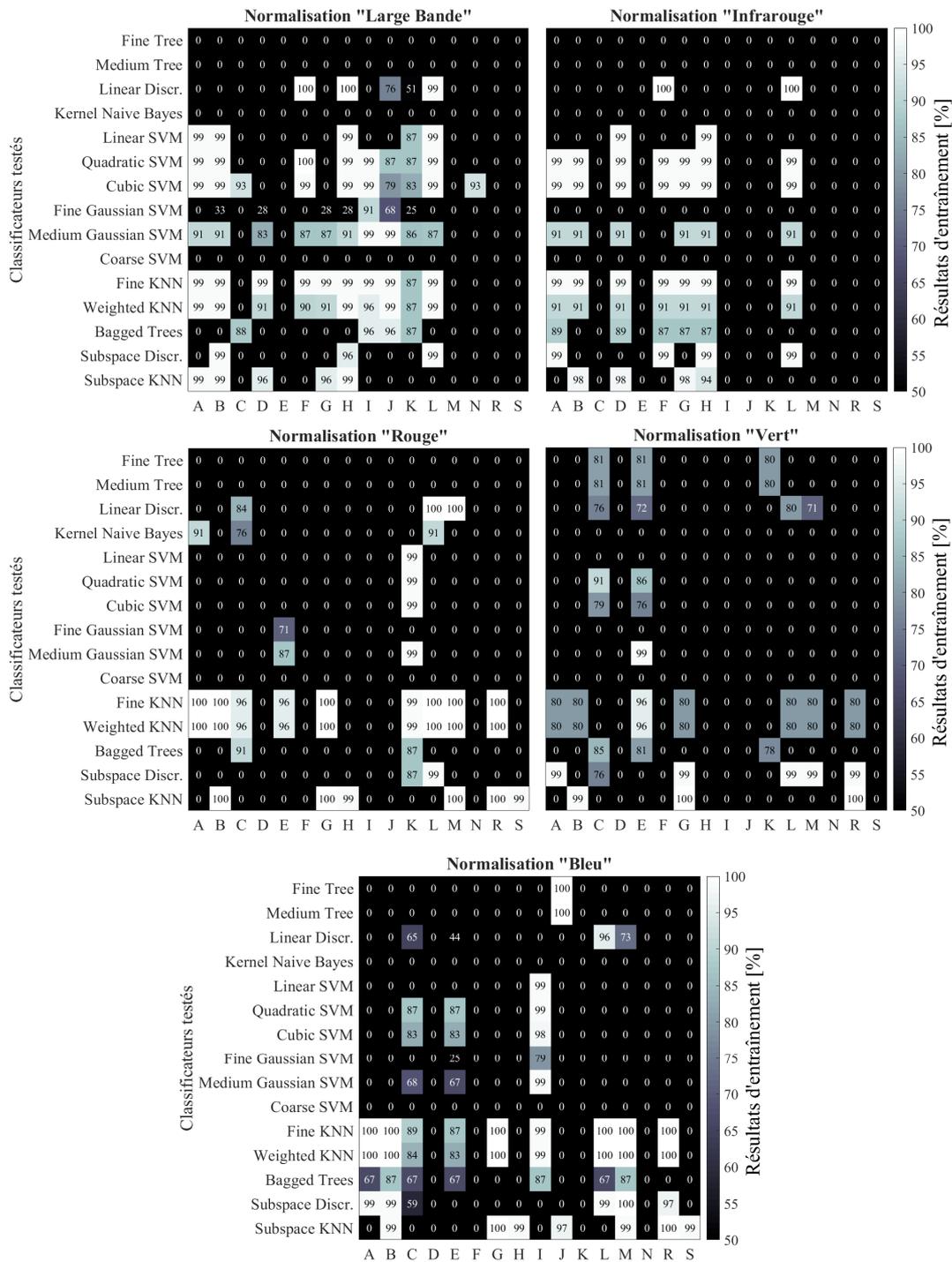


Figure 3.20 : Résultats de généralisation des classifieurs pour les différents types de normalisation appliqués aux données.

3.2.3 Évaluation en environnement lumineux réel

Pour cette dernière étape du processus d'entraînement de classifieurs de données, il s'agit d'évaluer les performances en conditions des différentes associations des classifieurs qui ont été sélectionnées par les deux étapes précédentes.

Il s'agit de leur fournir des mesures non idéales ou la source de lumière peut connaître des interférences. La source de ces interférences peut venir du fait que l'environnement lumineux n'est plus constitué d'une source unique de lumière à la fois. En effet, contrairement au cas de la généralisation, les conditions lumineuses dans un environnement réel peuvent être mixtes ou d'une source de lumière naturelle éloignée des sources connues de lumière (particulièrement dans le cas de lumière naturelle).

Au-delà du fait que la nature d'un environnement lumineux réel est plus riche dans ces variations et donc plus complexe, l'environnement réel testé ne comporte pas certaines sources de lumière utilisées pour l'entraînement et la généralisation des classifieurs. Ce faisant, la comparaison des performances entre chaque classifieur est plus délicate que lors des étapes précédentes.

Le moyen d'évaluation des performances des classifieurs utilisé ici repose sur deux critères. D'une part, un classifieur est considéré comme valide si, comme lors des étapes précédentes, il permet de reconnaître correctement une source de lumière lorsqu'elle est la seule présente dans l'environnement.

D'autre part, lorsque l'ambiance lumineuse de l'environnement est constituée de plusieurs sources, les classifieurs doivent être capables de distinguer au mieux la source principale de rayonnements. Cela induit donc l'évaluation de la robustesse des classifieurs à l'interférence d'autres sources de lumière. Le critère choisi pour cette évaluation consiste à ce qu'une source de lumière doit être reconnue comme étant la source de lumière principale lorsque celle-ci émet plus de la moitié de l'irradiance mesurée dans l'environnement. C'est-à-dire lorsque le ratio d'énergie observé dans un environnement est majoritairement émis par cette source de lumière.

Typiquement, lors du lever ou du coucher du soleil, une bascule s'opère entre un rayonnement solaire et le rayonnement artificiel. Le jour, la lumière naturelle émise par le soleil est prépondérante et l'émission de lumière artificielle est faible en comparaison. À l'inverse, pendant les périodes nocturnes, le rayonnement lumineux est principalement artificiel s'il y en a.

Pour les tests qui suivent, cette caractéristique d'un classifieur à passer d'une source reconnue à une autre en fonction de leur proportion d'irradiance respective est appelée « ratio de basculement ».

Pour réaliser cette dernière étape, des données d'analyse de l'environnement lumineux sont donc récupérées, dans le même environnement que celui des tests réalisés dans le Chapitre 2. Cet environnement est globalement composé de deux types de sources lumineuses. La première est celle produite par une lampe LED (3000K) installée au plafond, la seconde est la lumière naturelle provenant d'une fenêtre orientée au sud-est.

Il s'agit d'établir quels sont les classifieurs capables de répondre au premier critère d'évaluation, la reconnaissance d'une source simple. Puis les classifieurs satisfaisant ce premier critère sont départagés par le second critère en confrontant la classe de source reconnue avec la proportion d'irradiance que celle-ci émet dans l'environnement observé. Cette mesure de l'irradiance est réalisée à l'aide d'un spectromètre et le calcul de proportion est établi à partir de la composante artificielle de lumière qui est relativement stable (lampe du plafonnier à intensité fixe).

La campagne de mesures de plusieurs dizaines de jours est conduite¹. Parmi les mesures réalisées, une journée particulière est sélectionnée pour évaluer le niveau de performances de classifieurs. Cette journée a la particularité d'avoir un niveau de lumière naturelle très variable et mélangé à de la lumière artificielle sur l'intégralité de la journée. Cette journée de mesure apparaît comme la plus défavorable pour le système d'analyse en comparaison des autres journées étudiées moins riches en variations et en mélange de sources de lumière. Cette journée « défavorable » donne l'occasion de tester les classifieurs pour des sources de lumière avec un niveau d'interférence plus important, avec de la lumière artificielle tout au long de la journée.

De plus, le fait que la lumière artificielle soit toujours présente permet d'observer plus facilement le ratio de basculement des classifieurs étant donné que la quantité d'irradiance émise par un éclairage fixe et non réglable est constante.

La Figure 3.21 montre le résultat de classification pour cette journée en utilisant un classifieur « Fine KNN » en association avec la configuration de données R avec une normalisation par rapport au bleu (B). Durant la journée étudiée, ce classifieur se montre capable de basculer d'une source à l'autre dans le cas d'une source mixte

¹ Dans la suite du manuscrit, le nombre de journées évaluées est de 16 jours tandis que dans le chapitre 2 il était question de 21 jours. Cette différence du nombre de jours observés s'explique par la coupure de la connexion wifi permettant au dispositif à faible coût de transmettre ses mesures à la base de données.

lorsque les proportions sont quasiment égales. Dans cet exemple, le ratio de basculement est égal à 58 %. C'est-à-dire que tant que l'irradiance émise par la LED dans l'environnement est supérieure à 58 %, le classifieur reconnaît cette source. Dans le cas où cette proportion de lumière artificielle passe sous ce seuil de 58 %, alors le classifieur détermine que l'environnement est composé de lumière naturelle à travers une vitre.

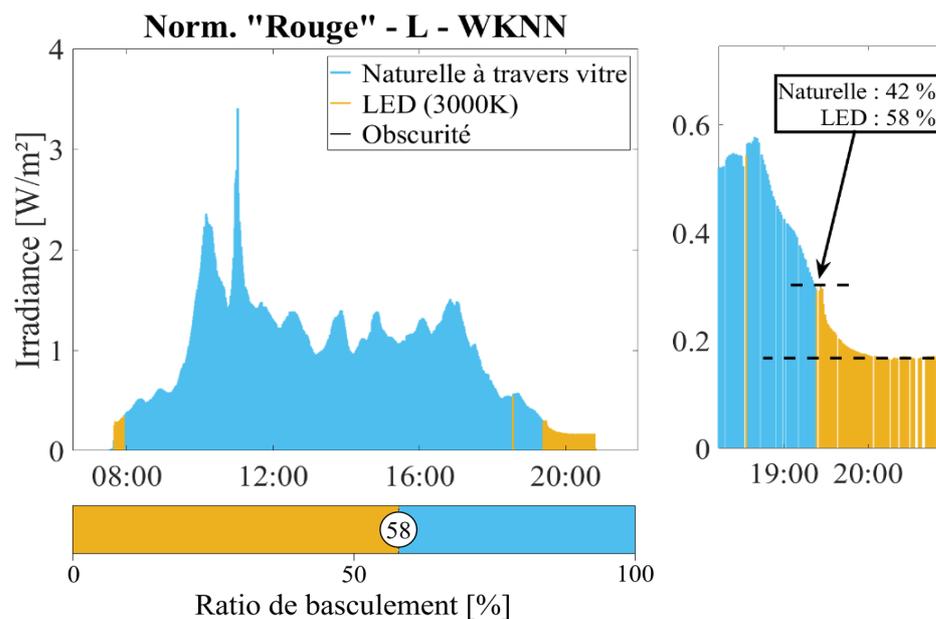


Figure 3.21 : Résultats de validation d'un classifieur utilisant la méthode « Fine KNN » associée à la configuration de données R.

Les résultats de ces tests donnent un total de 24 classifieurs répondants au premier critère de sélection. Le ratio de basculement de chacun de ces classifieurs est présenté dans la Figure 3.22.

Dans l'ensemble, les classifieurs valides fonctionnent en majorité à partir de la normalisation par rapport aux valeurs « Bleu ». De même, près de 75 % de ces classifieurs utilisent des classifieurs de type « K plus proches voisins » (KNN).

En ce qui concerne le critère de ratio de basculement, six classifieurs ont un basculement proche de 50 % (± 10 %). Les deux classifieurs les plus proches de cette valeur de basculement sont les classifieurs « Fine KNN » qui utilisent les configurations de données G ou R, en association avec la normalisation par rapport à la valeur bleue (B). Finalement, grâce à l'ensemble des tests et des résultats qui sont présentés dans les paragraphes précédents, la classification de sources de lumière en environnement d'intérieur semble possible. Cela a été montré dans un environnement

lumineux réel, bien que ce type d'ambiance lumineuse présente des spectres de lumière hybrides. Les classifieurs les plus performants se sont montrés capables de déterminer qu'elle est la source lumineuse la plus importante en termes d'énergie émise dans cet environnement non idéal d'analyse.

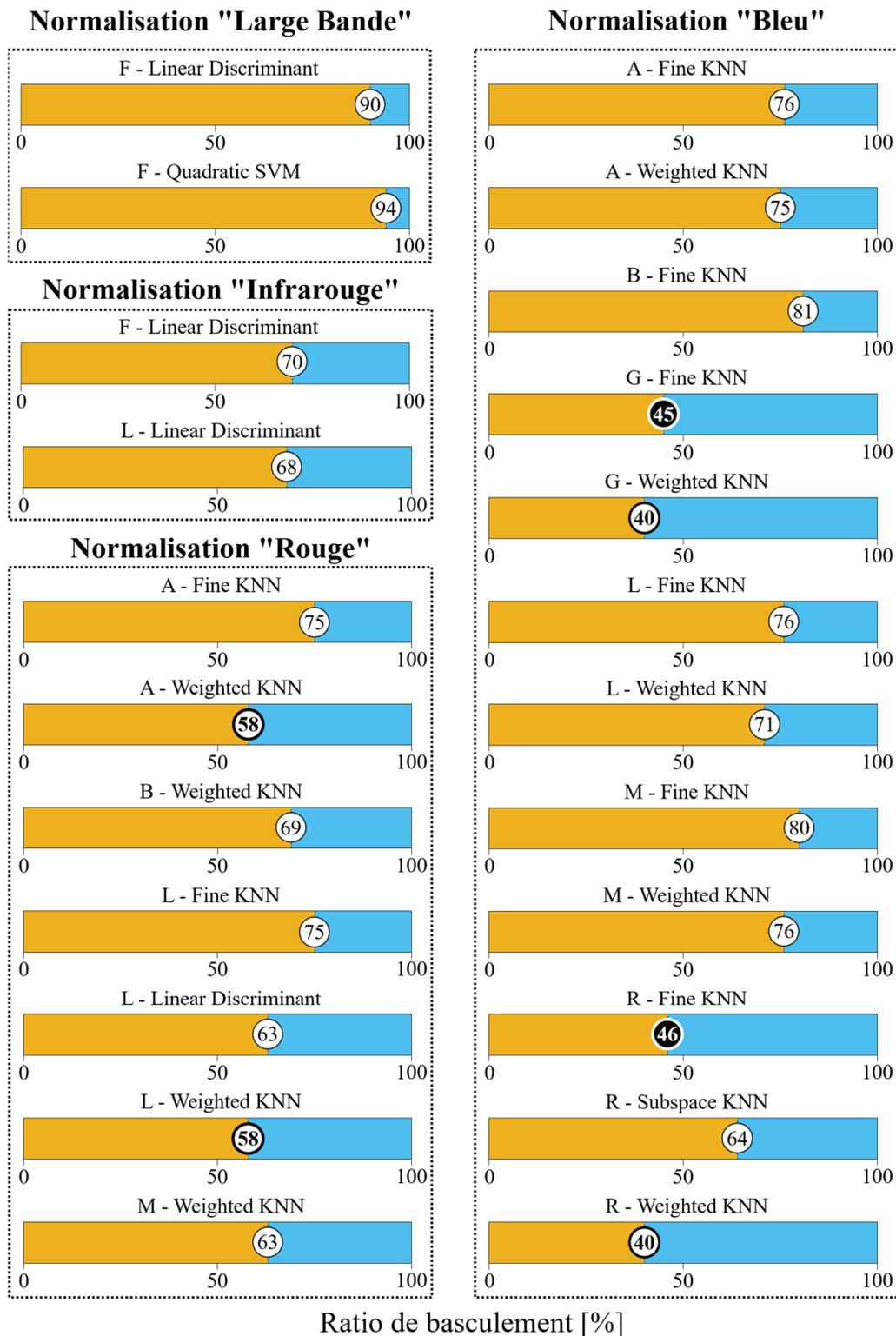


Figure 3.22 : Valeur du ratio de basculement des classifieurs valides. 6 classifieurs ont un ratio proche de la valeur souhaitée de 50 %.

Dans une optique plus pratique et pour faciliter l'entraînement de classifieurs pour d'autres environnements, une interface graphique a été développée.

Celle-ci se base sur les observations acquises grâce à l'interface présentée dans la sous-section 3.1.3 et illustrée par la Figure 3.5. Comme le montre la Figure 3.23, l'utilisateur peut sélectionner un environnement d'observation existant pour que le jeu de données qui y est associé soit utilisé pour l'entraînement du classifieur. La méthode de classification utilisée est uniquement celle des « K plus proche(s) voisin(s) », d'une part parce que c'est la méthode qui donne les meilleurs résultats, mais également dans un souci de simplicité pour l'utilisateur.

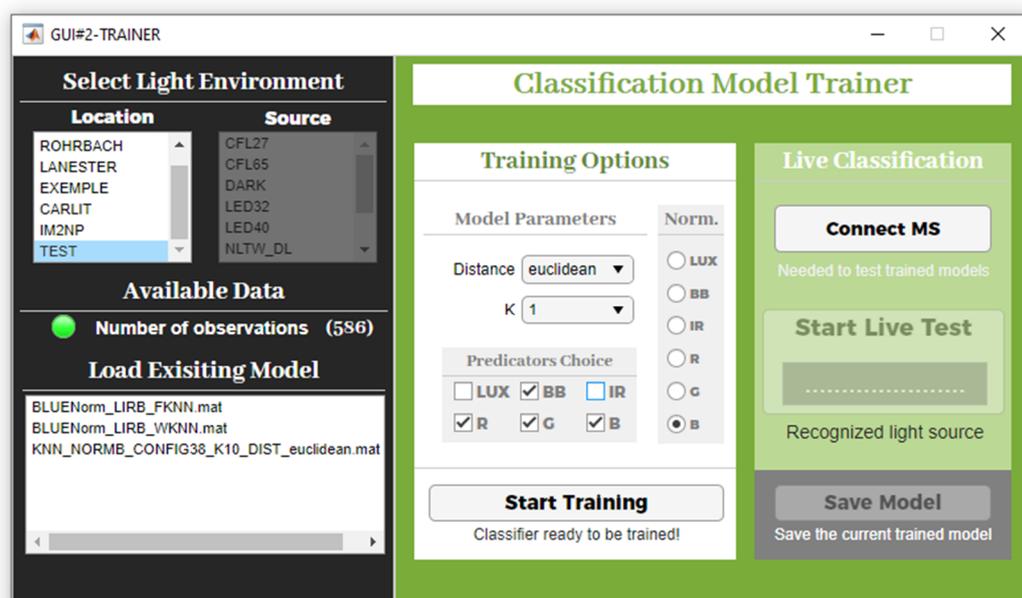


Figure 3.23 : Interface graphique permettant d'entraîner des classifieurs de source de lumière à partir des jeux de données constitués par l'interface graphique de la Figure 3.5. Le bouton « Connect MS » permet de connecter le dispositif à faible coût surnommé « MicroSpectro » (MS).

Ensuite, les différents paramètres peuvent être choisis. Notamment le type de normalisation de la différence à appliquer et la configuration des données. Les paramètres « Distance » et « K » de la méthode de classification présentée en exemple dans la figure correspondent à ceux de la méthode appelée « Fine KNN ».

Finalement, une fois l'entraînement réalisé, le classifieur entraîné peut être enregistré pour être utilisé à posteriori. L'utilisateur peut également choisir de connecter le dispositif de mesure à faible coût à l'interface par connexion USB pour tester la capacité du classifieur à reconnaître les sources de lumière directement.

3.2.4 Contraintes et limites des capteurs commerciaux

Avant de conclure ce chapitre, il est important de noter que les capteurs commerciaux utilisés pour le système d'analyse à bas coût n'offrent pas les mêmes standards de qualité qu'un appareil tels qu'un spectromètre.

En effet, les capteurs utilisés peuvent être sujets à une certaine inconsistance d'un capteur à l'autre. Il est donc nécessaire de s'assurer que les résultats d'observations de différents capteurs peuvent être utilisés avec les modèles entraînés. Cela permettra de s'assurer qu'à la suite de l'entraînement d'un classifieur, avec les données d'un de nos systèmes d'analyse, celui-ci peut être utilisé pour classer des observations provenant d'un autre de nos systèmes d'analyse.

Des tests menés en environnements contrôlés ont permis de mettre en lumière la différence de mesures entre deux des systèmes développés dans ce chapitre. La Figure 3.24 présente les pourcentages de différence, avec ou sans normalisation, entre deux systèmes d'analyse semblables. Ces deux capteurs sont soumis aux cinq types de sources lumineuses utilisées durant l'étape de généralisation.

Comme le montre le cas de la normalisation « Vert » et plus particulièrement les normalisations « Rouge » et « Bleu », la normalisation la différence peut engendrer d'importantes différences entre les valeurs de deux capteurs. Dans l'exemple de la normalisation par rapport aux valeurs de bleu ou de rouge, des différences de plus de 200 % apparaissent. Ce type d'artéfact apparait lorsque deux valeurs sont très proches, dans ce cas ce sont les valeurs (R) et (B). La différence de valeur entre le système de référence et le second est très faible (proche de 0), mais leur valeur étant également très faible, l'imprécision de mesure devient non négligeable et donne une valeur de différence (ou d'erreur) importante.

En conclusion de ces observations, il est possible de considérer que la méthode de classification ne pose pas d'inconvénient à la reconnaissance des spectres lumineux.

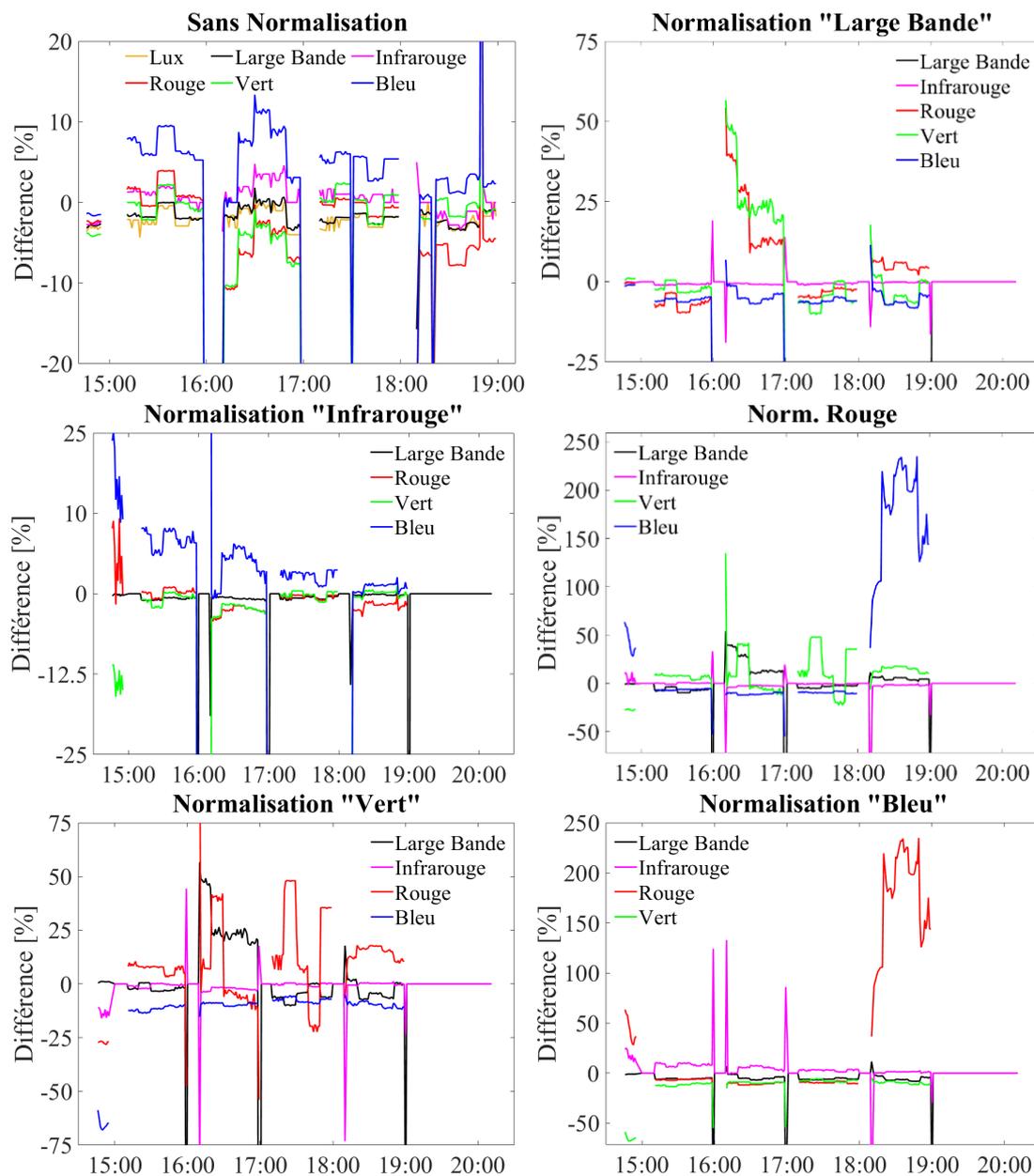


Figure 3.24 : Différence entre un système d'analyse de la lumière à faible coût par rapport à un système semblable de référence. Ces différences sont données en fonction des différentes normalisations utilisables ainsi que sans normalisation.

3.3 Conclusion du chapitre

À la suite du développement et à l'utilisation d'un système à faible coût (environ 40 € pour un prototype), il a été démontré qu'il est possible de reconnaître la nature de la source lumineuse dans un environnement d'intérieur, grâce à un processus d'entraînement supervisé, de généralisation et de validation. Cette approche, bien qu'elle ait déjà fait ses preuves dans la littérature pour des environnements contrôlés,

n'avait pas encore démontré ces performances en environnement réel. Parmi les 1752 différents classifieurs testés au total dans ce chapitre, seulement 264 ont passé avec succès l'étape d'entraînement. Ensuite, l'étape de généralisation a permis de sélectionner 42 classifieurs parmi ceux entraînés précédemment. Enfin, la dernière étape de validation a retenu 24 classifieurs dont les performances ont été jugées comme valides dans l'environnement réel étudié.

Un élément important qui a permis d'obtenir ses 24 classifieurs est l'application de la technique de normalisation de la différence. Celle-ci a démontré sa capacité à améliorer les performances de classification de manière significative. À l'issue de ces tests, c'est la normalisation par rapport à la valeur bleue mesurée par le système qui apparaît comme la plus favorable à l'entraînement de classifieurs performants. Concernant les classifieurs, c'est le type « K plus proches voisins » (KNN) qui a permis les résultats les plus intéressants. Enfin, en termes de configuration de données, les meilleurs résultats de classifications sont obtenus avec l'utilisation au minimum de quatre valeurs du système d'analyse (*BB*) (*R*) (*G*) et (*B*), avec la configuration *R*. Cela montre que l'utilisation de l'ensemble des données n'est pas nécessaire à l'obtention d'une classification performante. Le nombre de valeurs ne peut cependant pas être réduit de plus de deux valeurs sans risquer une perte de performance.

En conclusion, les résultats obtenus démontrent que le système développé, qui associe un dispositif de mesure à faible coût et à faible niveau de données à une méthode de classification par apprentissage supervisé, est une solution viable et fiable pour reconnaître le type de source lumineuse dans un environnement réel. Et cela reste vrai malgré une variation observable d'un même type de capteur à un autre et avec des variations d'intensité qui pouvaient être problématiques pour la classification d'un nombre réduit de données. Le système s'est affranchi de ces deux obstacles à la réussite de la classification grâce à l'implémentation de la normalisation des différences.

Enfin, ce système valide la première étape du développement d'un moyen de mesures capable de remplacer avantageusement un spectromètre pour notre modèle de calcul de l'énergie récupérable présenté dans le Chapitre 2. Une étape supplémentaire de traitement des données est maintenant nécessaire avant de pouvoir utiliser ces données avec notre modèle de calcul. Le chapitre suivant se concentre sur donc cette seconde étape.

Chapitre 4

Évaluation de l'énergie récupérable par méthode de reconstruction spectrale

4.1 Méthode de reconstruction du spectre lumineux.....	108
4.2 Reconstruction de spectres en environnement contrôlé	110
4.3 Reconstruction de spectres en conditions réelles	114
4.3.1 Variations du spectre de la lumière naturelle.....	115
4.3.2 Amélioration du système d'analyse.....	117
4.3.3 Application finale de la méthode d'analyse.....	120
4.4 Conclusion du chapitre.....	125

Le Chapitre 3 a démontré comment la nature de la source de lumière présente dans l'environnement peut être déduite grâce au dispositif à bas coût de la Figure 3.4. Mais pour que le modèle présenté dans le Chapitre 2 puisse effectuer ses calculs à partir de ce moyen de mesure, ce sont des spectres lumineux qui doivent lui être fournis. Il est donc nécessaire de trouver un moyen pour recréer des spectres lumineux à partir des résultats de classification des sources et des niveaux d'éclairiments mesurés par le système d'analyse à faible coût.

Ce chapitre décrit donc, dans un premier temps, comment les données récupérées par le système à faible coût peuvent être utilisées pour fournir un spectre au modèle du Chapitre 2. Au travers de tests expérimentaux, les spectres obtenus par la méthode de reconstruction sont mis en concurrence avec ceux obtenus par le spectromètre « onéreux » utilisé dans le cadre des analyses du chapitre 2. Ainsi la méthode complète d'évaluation de l'énergie récupérable utilisant ces données sera testée pour déterminer ses performances (comparaison avec les résultats obtenus en utilisant un spectromètre, degré de précision par rapport à la récupération réelle).

4.1 Méthode de reconstruction du spectre lumineux

Pour que les données obtenues grâce au système développé dans le Chapitre 3 puissent être utilisées par notre modèle dans l'environnement observé, il est nécessaire d'arriver à reproduire ce qu'un spectromètre obtient lors de son utilisation. Ce processus de reconstruction qui se fait en 4 étapes est décrit par la Figure 4.1 :

- L'étape n° 1 consiste à transmettre les données acquises par le prototype au classificateur.
- L'étape n° 2 consiste à utiliser le classifieur entraîné pour qu'il reconnaisse le type de source lumineuse. Le spectre de référence correspondant à celui de la source reconnue est alors associé à cette observation. Les spectres de référence sont regroupés sous la forme d'une bibliothèque de spectres constituée au préalable lors de la création du jeu de données d'entraînement (voir la sous-section 3.1.3).

- L'étape n° 3 combine le spectre de référence et la mesure d'intensité lumineuse (lux) pour ajuster l'intensité du spectre afin que son intensité lumineuse corresponde à celle mesurée par le capteur.
- L'étape 4 consiste à transmettre le spectre reconstitué au modèle de calcul pour évaluer la puissance et l'énergie récupérable, comme cela a déjà été expliqué dans le Chapitre 2.

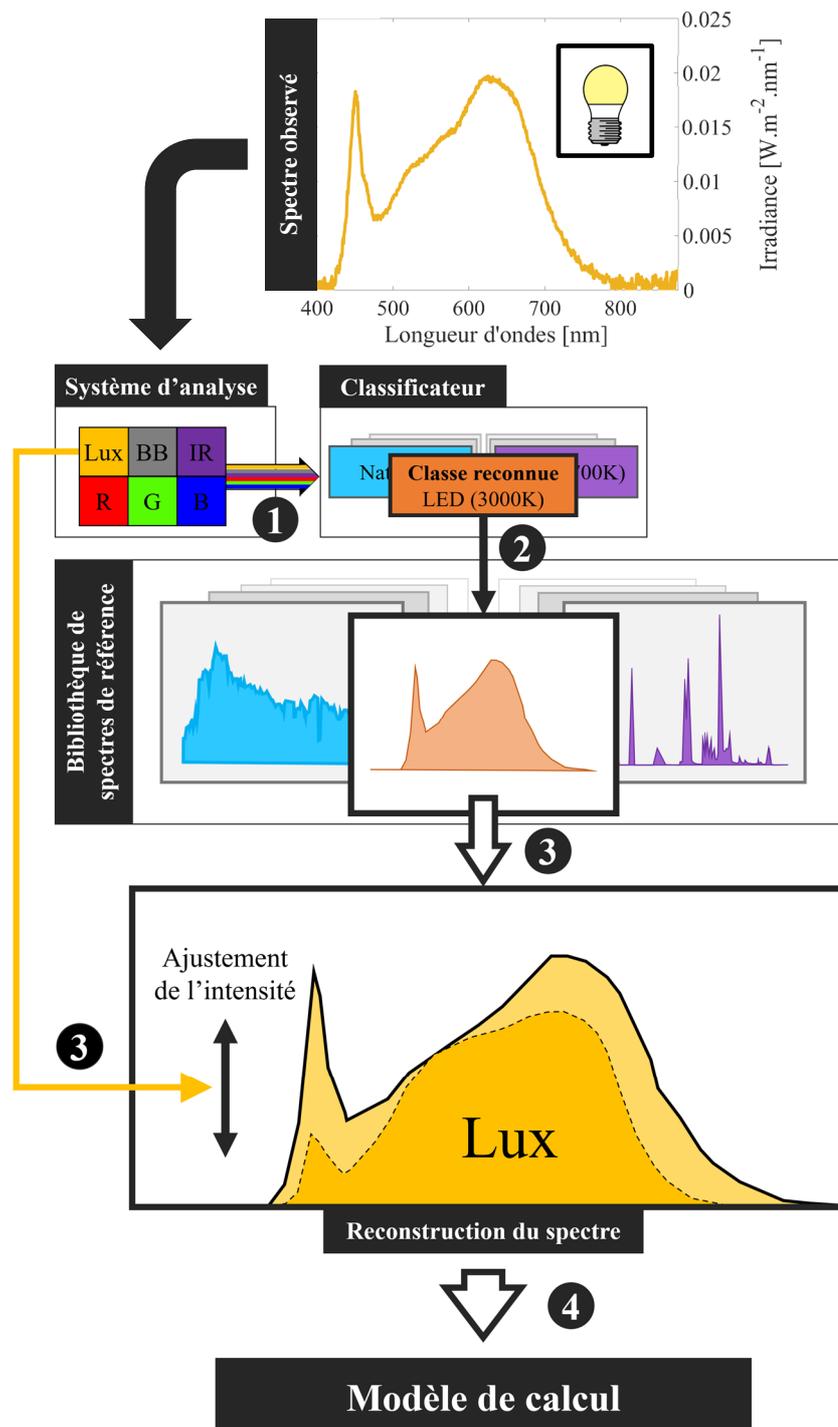


Figure 4.1 : Schéma descriptif du processus de reconstruction du spectre à partir des mesures du système à bas coût.

À partir des résultats présentés dans le Chapitre 3, la méthode de classification des sources de lumière retenue comme la plus performante est celle appelée « Fine KNN », en association avec la configuration de donnée G (voir la sous-section 3.2.1). En ce qui concerne la méthode de normalisation de la différence, qui pour rappel permet une nette amélioration des résultats de classification (voir 3.2.1 b.), c'est la normalisation par la valeur « Bleu » qui s'est montrée la plus favorable à une classification performante.

Par conséquent, le classifieur utilisé dans ce chapitre pour présenter la méthode de reconstruction des spectres lumineux est un classifieur entraîné à partir de ces trois éléments : configuration des données G , la normalisation de la différence « Bleu » et méthode de classification « Fine KNN ».

4.2 Reconstruction de spectres en environnement contrôlé

Afin d'éprouver notre méthode de reconstruction du spectre, ce sont d'abord des mesures en environnement contrôlé qui sont réalisées. À chaque mesure du système d'analyse à bas coût est associé un spectre reconstruit traité par le modèle de calcul. Il est possible, dans un environnement contrôlé, de faire une comparaison directe entre les valeurs de puissance électrique réellement injectée dans la batterie par le récupérateur d'énergie, la puissance récupérable calculée issue des spectres du spectromètre, et la puissance récupérable calculée à partir des données mesurées par le prototype d'analyse à faible coût. Cette première étape de mesures en ambiance contrôlée est un test intermédiaire avant de passer à une étude en ambiance réelle dans laquelle les sources lumineuses sont plus difficilement identifiables.

Cette étape préliminaire a également pour rôle de vérifier si des imprécisions des capteurs peuvent venir dégrader les performances du système. Comme cela a déjà pu être discuté dans le Chapitre 3, les capteurs utilisés par le système à bas coût, bien que très peu coûteux, souffrent de certaines imprécisions. Bien que ces imprécisions n'aient pas d'impact sur la méthode de reconnaissance du type de source lumineuse, il n'est pas garanti qu'il en soit de même pour la reconstruction des spectres.

Pour établir si cette imprécision des capteurs a un impact dans le cadre de la reconstruction du spectre lumineux ambiant, un premier test de reconstruction est réalisé avec les données récoltées dans l'environnement contrôlé décrit par la Figure 3.19 (sous-section 3.2.2). Les résultats de calcul du modèle obtenus à partir de cette reconstruction, exposés dans la Figure 4.2, ne laissent pas de doutes quant à l'imprécision de la reconstruction des spectres. Les valeurs de puissance et d'énergie récupérables sont très différentes de celles obtenues grâce au spectromètre (+14,5 % par rapport à la valeur d'énergie récupérable finale) ou ceux mesurés en pratique (+23,2 %).

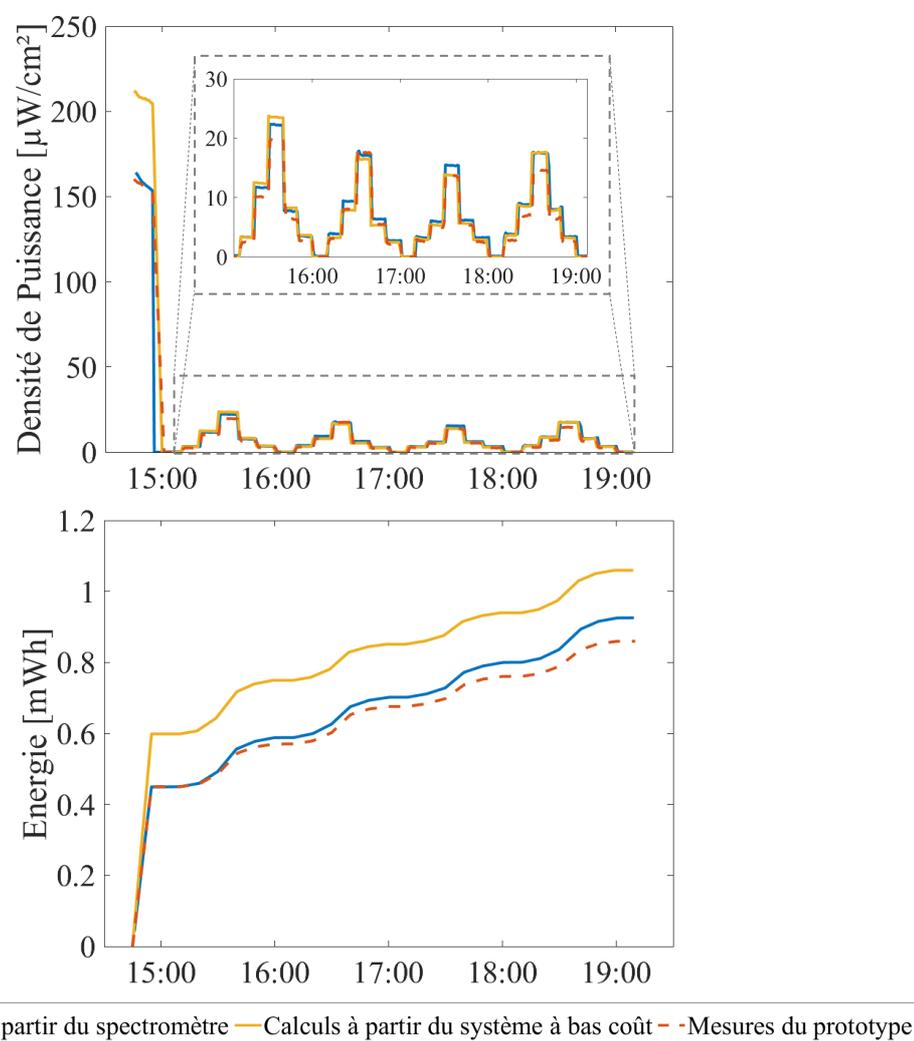


Figure 4.2 : Résultats du modèle de calcul à partir du premier test de reconstruction dans un environnement lumineux contrôlé.

Le fait que la puissance soit parfois surestimée, parfois sous-estimée et que cela varie en fonction du type de source lumineuse, laisse à penser que c'est effectivement la mesure d'intensité lumineuse du capteur TSL2561 qui induit cet écart.

Pour vérifier que l'erreur induite dans le processus de reconstruction est bien imputable à une imprécision de la mesure d'intensité lumineuse du capteur TSL2561, les valeurs mesurées par ce dernier sont comparées à celles du spectromètre qui font office de référence.

Comme le montre la Figure 4.2, les valeurs mesurées par le capteur TSL2561 ne sont effectivement pas toujours égales à celles du spectromètre et varient selon le type de source à laquelle sont exposés ces instruments de mesure.

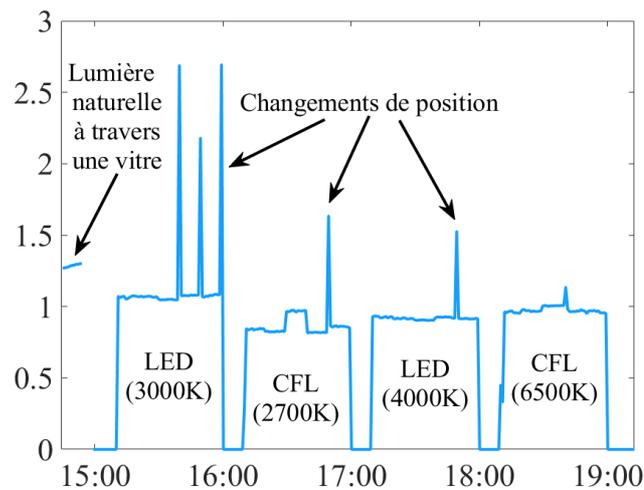


Figure 4.3 : Valeurs d'intensité lumineuse données par le capteur TSL2561 et normalisées par rapport aux valeurs observées par le spectromètre. Ses valeurs dépendent du type de source lumineuse ainsi que l'intensité à laquelle le capteur est soumis.

En effet, hormis sous la source de lumière CFL (6500K), pour laquelle la différence de mesures entre le capteur et le spectromètre est très faible, les mesures sous les autres sources lumineuses montrent des différences non négligeables.

Par exemple, sous une des sources de lumière à LED (3000K) utilisée dans ce test, l'écart moyen observé est de 11,5 %. Le capteur surestime la valeur d'intensité lumineuse dans ce cas. C'est également le cas de la lumière naturelle, pour laquelle cette surestimation approche les 30 %. À l'inverse, sous les deux autres sources de lumière, cette valeur est sous-estimée.

À la lumière de ces résultats, il est possible de conclure que le capteur utilisé pour mesurer l'intensité lumineuse est sensible aux différences de spectres lumineux. Contrairement à un spectromètre, la valeur donnée par le TSL2561 peut donc être plus ou moins précise selon le type de source lumineuse.

À partir de ces observations, il est possible de corriger ces variations de mesures du luxmètre en établissant des coefficients de corrections du niveau d'intensité lumineuse mesurée par notre système. Chaque coefficient de correction peut être défini comme la moyenne de l'écart entre les valeurs du capteur et les valeurs de référence du spectromètre pour chacune des sources étudiées.

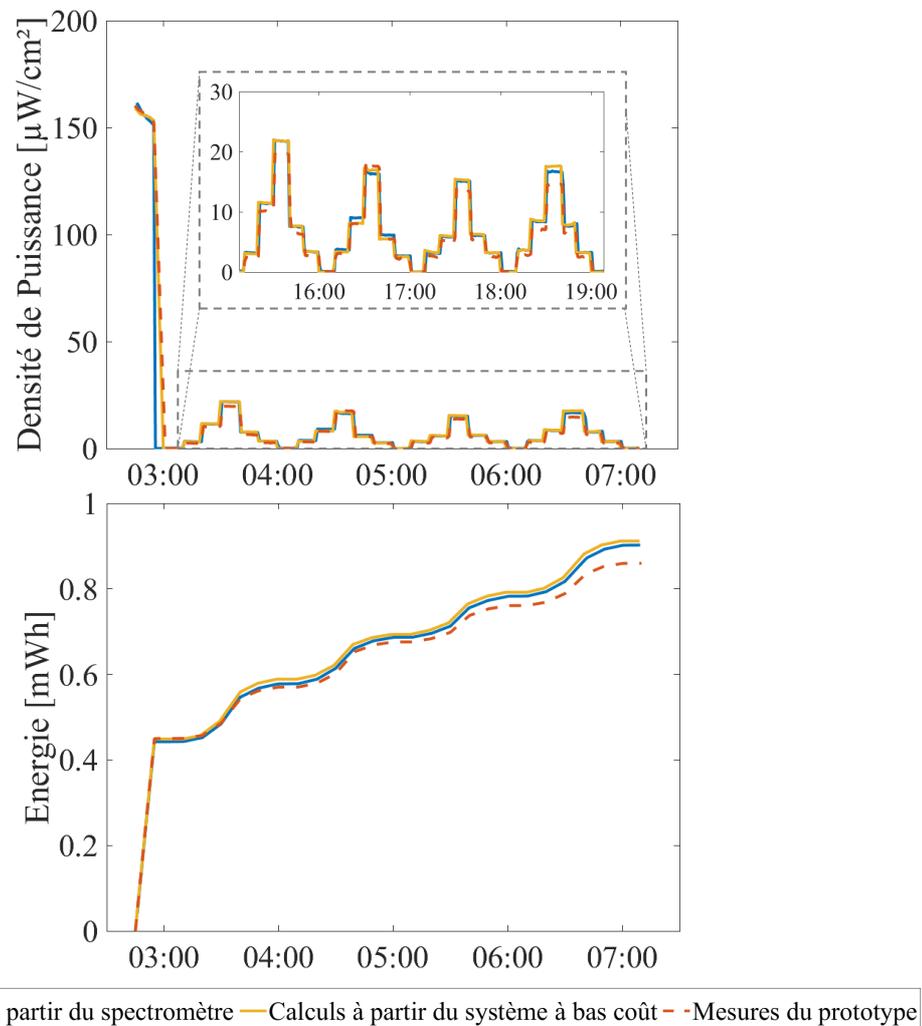


Figure 4.4 : Résultats du modèle de calcul à partir des données de reconstruction prenant en compte les coefficients de correction de l'intensité lumineuse. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus par le modèle avec des mesures réalisées au spectromètre et ceux obtenus en pratiques avec le prototype.

En prenant en compte ces corrections dans le processus de reconstruction, les résultats de calculs obtenus avec le modèle à partir de ces données corrigées sont grandement améliorés. En effet, comme le montre la Figure 4.4 une nette amélioration des calculs issus de la reconstruction de spectre est visible. L'erreur entre ces résultats et ceux obtenus avec le spectromètre n'est plus que de 1,05 % et de 6,1 % avec les résultats du prototype, contre respectivement 14,46 % et 23,2 % avant l'ajout de cette correction.

Maintenant que le modèle de calcul donne des résultats satisfaisants de l'énergie récupérable en environnement lumineux contrôlé grâce à la reconstruction de spectre, il faut s'assurer que des résultats similaires peuvent être atteints en conditions réelles.

4.3 Reconstruction de spectres en conditions réelles

Pour valider l'ensemble de la méthode présentée d'analyse de l'énergie électrique récupérable d'un environnement lumineux d'intérieur contrôlé, des tests en environnement réels sont réalisés. Ceux-ci ont pour but de poursuivre l'analyse des biais de mesures que le système à faible coût induit.

Dans un premier temps, la méthode présentée dans les paragraphes précédents est appliquée à des mesures en environnement réel pour évaluer ses performances, en utilisant les coefficients de correction pour la reconstruction de spectres.

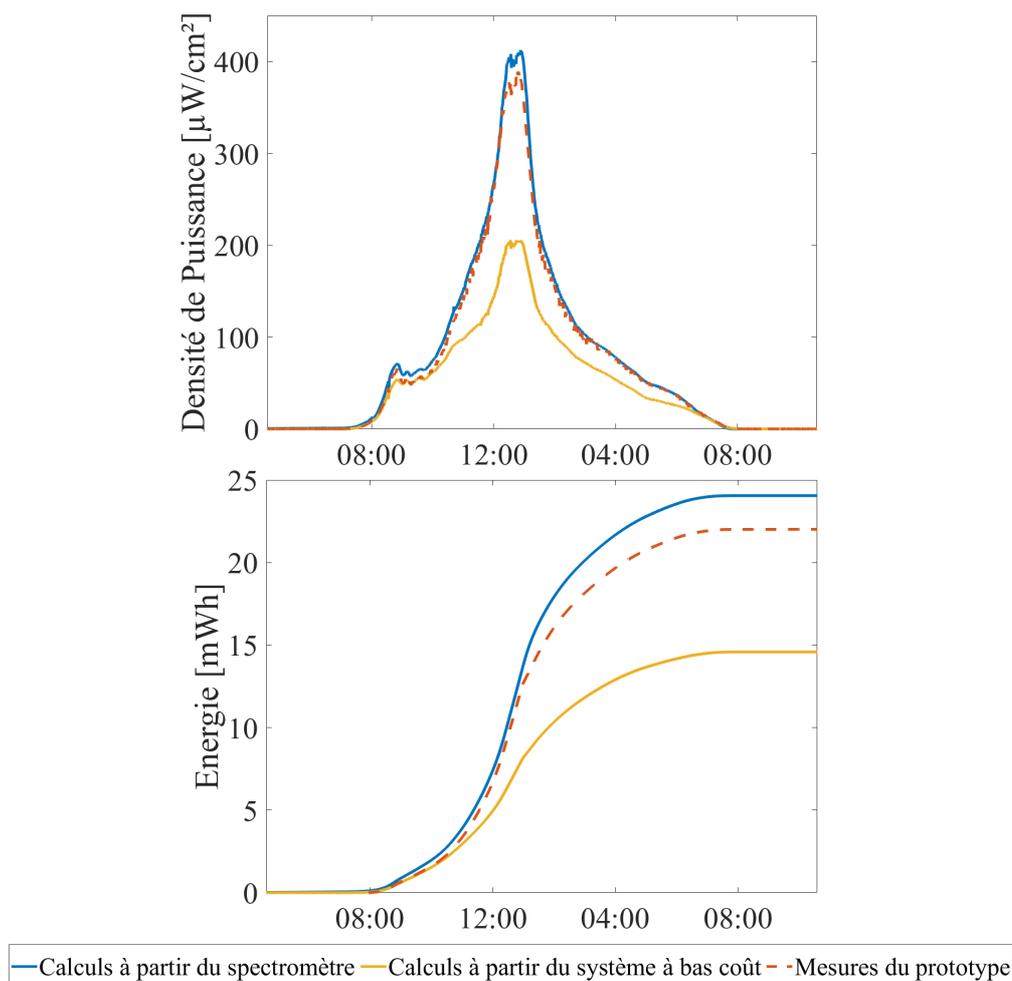


Figure 4.5 : Premiers résultats de l'application de la méthode de reconstruction de spectre à des mesures réalisées en environnement réel.

La Figure 4.5 montre le résultat qui est obtenu pour des mesures réalisées sur une journée réelle. Cette observation est issue du même environnement que celui présenté dans la section 2.2.3 du Chapitre 2 et illustrée par la Figure 2.19, dont la source principale dans l'environnement de test est la lumière naturelle filtrée à travers une vitre. Durant cette observation, réalisée lors d'une journée ensoleillée, la lumière naturelle a atteint des niveaux d'intensité lumineuse importants (2400 lux).

On constate que malgré les corrections, les résultats obtenus par la méthode de reconnaissance du type de lumière et de reconstruction du spectre sont très largement sous-estimés par rapport aux résultats de calculs du modèle à l'aide du spectromètre.

En appliquant cette méthode à plus d'une dizaine d'observations dans des conditions lumineuses variées, le pourcentage moyen de l'erreur absolue entre les résultats du modèle avec le spectromètre et avec le système à faible coût est de 43,6 % (40 % avec les valeurs du prototype). Ce système souffre donc d'une importante sous-estimation pour le calcul de l'énergie récupérable.

Ce problème vient du fait que le capteur TSL2561, utilisé pour obtenir les valeurs d'intensité lumineuse, donne des résultats à peu près identiques à ceux du spectromètre entre 300 et 600 lux, mais peut dévier significativement en dehors de cette plage (illustration dans la Figure 4.6). Pour se rapprocher des valeurs obtenues avec un spectromètre, il faut donc prendre en compte ce comportement afin de corriger les valeurs mesurées.

Un point supplémentaire qui complexifie l'intégration des coefficients de corrections des variations de la valeur de lux de notre système d'analyse est que la lumière varie de manière importante en intensité, mais également dans sa composition spectrale au fil d'une journée.

La section suivante s'intéresse donc à cette spécificité de la lumière naturelle et sur la manière d'implémenter une correction adéquate.

4.3.1 Variations du spectre de la lumière naturelle

Des mesures sont utilisées afin d'y appliquer notre méthode de reconstruction de manière à étudier et corriger le biais de mesures introduit par notre système de mesures et ainsi être capables d'évaluer correctement l'intensité lumineuse de l'environnement

ambiant. Les mesures utilisées correspondent à celles obtenues pour la validation du modèle présenté dans le Chapitre 2 en environnement réel.

Parmi les journées d'observations disponibles, la composition spectrale de certaines d'entre elles est essentiellement naturelle. Ces journées sont privilégiées pour l'observation de l'évolution de l'erreur du système à bas coût en fonction de la lumière naturelle. La Figure 4.6 illustre cette évolution pour une ambiance lumineuse uniquement composée de lumière naturelle sur l'ensemble de la journée.

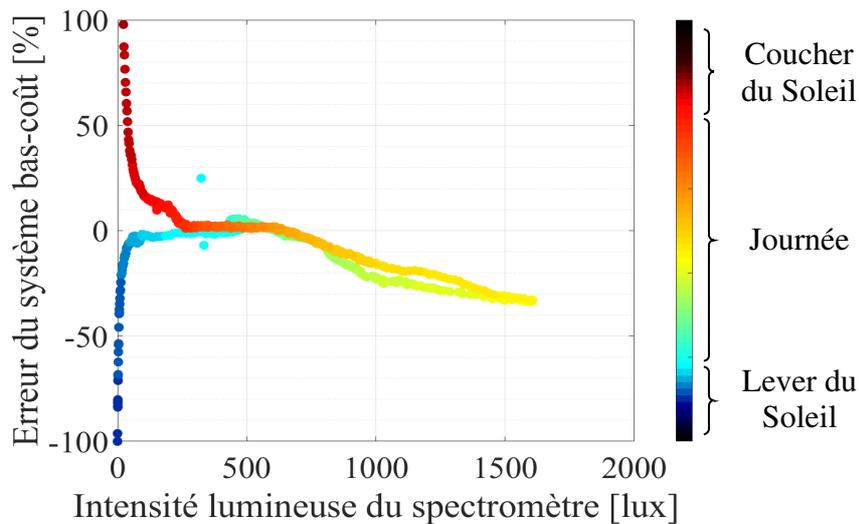


Figure 4.6 : Évolution de l'erreur de mesure de l'intensité lumineuse du système à faible coût en fonction de l'intensité lumineuse de référence du spectromètre. Mesures réalisées durant une journée entière dans un environnement essentiellement éclairé par la lumière naturelle passant au travers d'une fenêtre.

Tout au long de cette journée, il est possible de constater que les variations de la composition spectrale engendrent d'importantes fluctuations dans l'erreur de mesure de notre système. En effet, au-delà d'une simple déviation de la valeur mesurée par rapport à la valeur de référence du spectromètre, une différence entre la période de lever et celle du coucher du soleil est observable. Durant l'aube, le système à faible coût sous-évalue la valeur d'intensité lumineuse, tandis que durant la période de fin de journée il la surévalue.

À la lumière de ces résultats, il semble important de faire la distinction entre différents types de lumière naturelle observables au cours d'une journée. Il est possible de constater, en observant la Figure 4.7, que les spectres lumineux ne sont pas de la même composition le matin, lorsque l'intensité lumineuse est importante ou plus réduite durant la journée et le soir. Ces quatre périodes représentent des déviations différentes

de la valeur d'intensité lumineuse de référence avec celle du capteur luxmètre de notre système d'analyse.

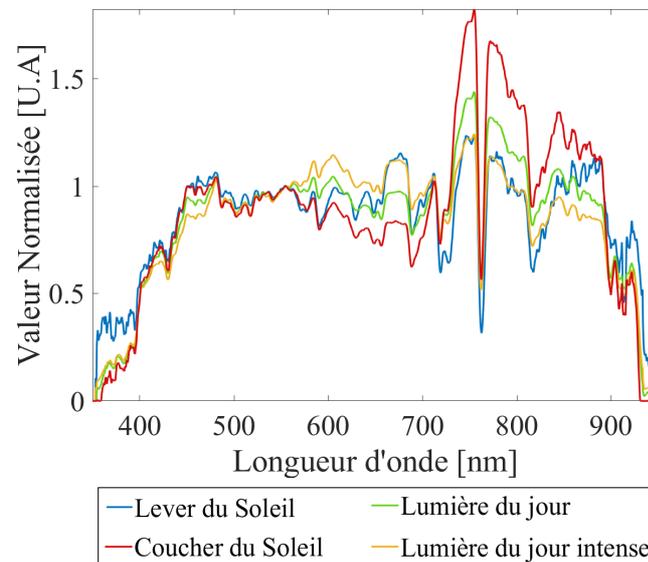


Figure 4.7 : Différence de composition entre 4 spectres lumineux de période différente de la journée.

En conclusion de ces observations, des ajouts à la base de données d'observations de notre système et à la bibliothèque de spectre de référence sont effectués pour que ces nouveaux éléments puissent être pris en compte par la suite. Ainsi, le classificateur utilisé jusqu'ici peut être entraîné à nouveau avec ces informations supplémentaires.

4.3.2 Amélioration du système d'analyse

Pour que la méthode de reconstruction soit plus précise, considérer que le spectre de la lumière naturelle comme constant n'est pas satisfaisant. Dès lors, il est nécessaire d'établir d'autres classes de sources de lumière naturelle qui correspondent aux spectres les plus différents et les plus présents dans l'environnement.

En prenant en comme référence les observations de la différence entre les valeurs de lux données par le spectromètre et celle de notre système (Figure 4.8), la lumière naturelle est découpée en quatre classes distinctes : la lumière naturelle matinale, la lumière naturelle du soir, la lumière du jour et finalement la lumière du jour de forte intensité. Le classificateur utilisé jusqu'ici doit être entraîné à nouveau pour qu'il puisse prendre en compte les sources nouvellement définies.

Pour compléter cette amélioration du système d'analyse, ces quatre types de sources lumineuses sont associées à des coefficients de corrections en fonction de la valeur

d'intensité lumineuse mesurée pour chacune de ces sources. Ces coefficients sont définis en établissant des fonctions caractéristiques de l'erreur du système sous les quatre différentes sources de lumière naturelle. Ainsi, en fonction de l'intensité lumineuse et de la source reconnue, la valeur de correction de l'intensité lumineuse est calculée et correspond aux évolutions mesurées visibles dans les cadres de la Figure 4.8.

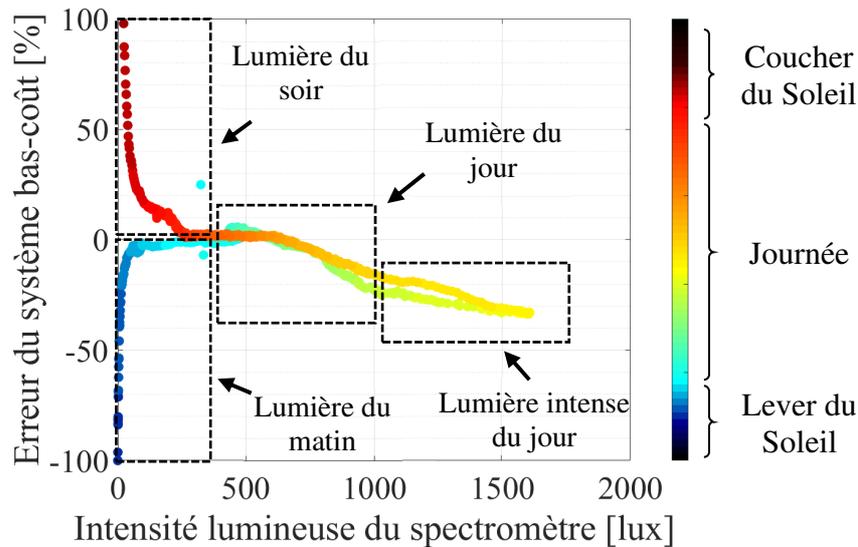


Figure 4.8 : Choix des différentes sources de lumière naturelle à ajouter au système de classification pour plus de précision.

Comme le montre le schéma de la Figure 4.9, ce moyen de correction de l'intensité vient s'ajouter comme étape intermédiaire à la reconstruction du spectre lumineux de l'environnement observé. Ce dernier ajout permet d'obtenir un système de reconstruction complet dont les performances doivent être à nouveau évaluées.

Une nouvelle reconstruction de spectres avec les mêmes données que celles du précédent test (voir Figure 4.5) est faite pour vérifier si cette méthode de correction est efficace et permet de meilleurs calculs du modèle. Les résultats de calcul, avec ces nouveaux spectres reconstruits, sont visibles dans la Figure 4.10. Contrairement au test précédent, les valeurs de puissance obtenues sont nettement plus proches de celles obtenues avec le spectromètre et même de celles mesurées en pratique par le prototype que précédemment. Il est donc clair que la correction décrite ici permet une très nette amélioration du système d'évaluation à faible coût lorsqu'elle est appliquée.

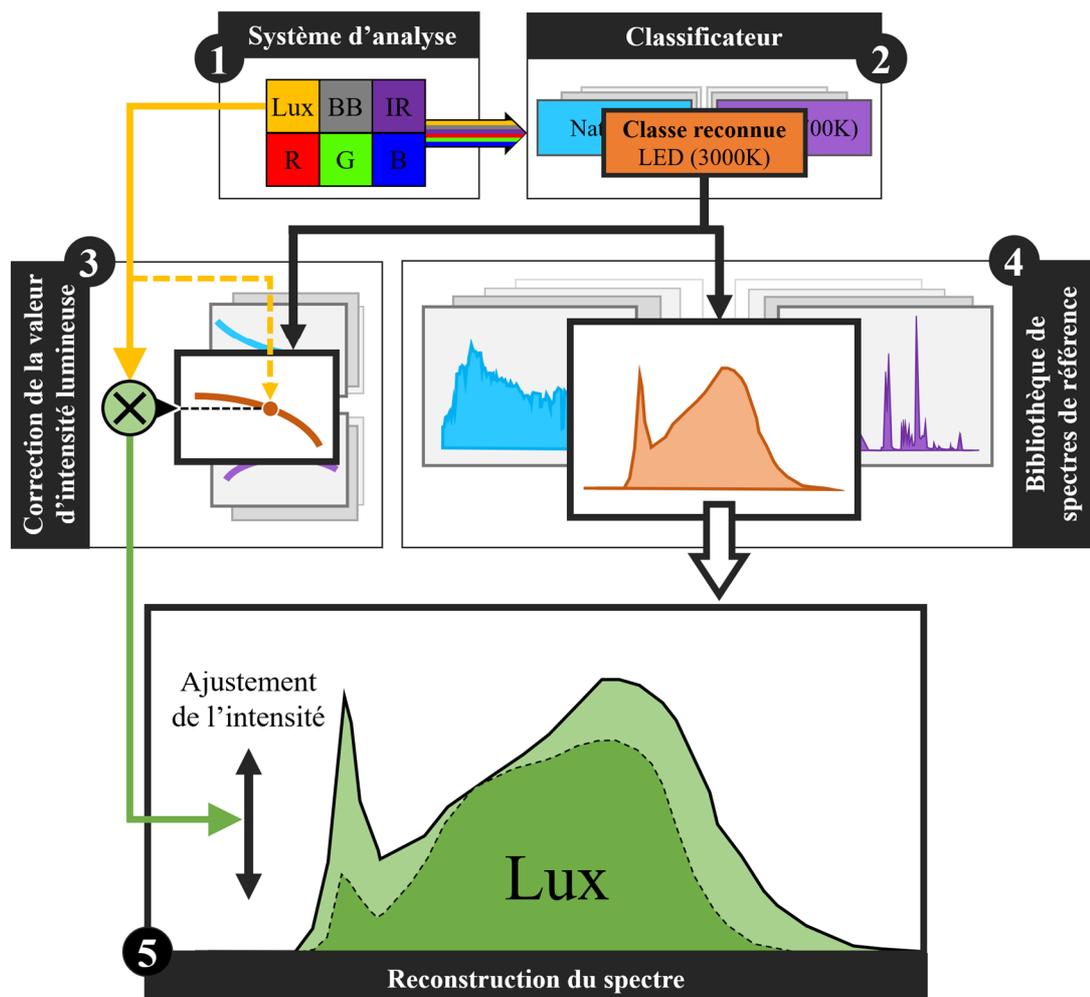


Figure 4.9 : Description du fonctionnement de la reconstruction de spectres avec l'ajout de la correction de la valeur de l'intensité lumineuse mesurée par le système à faible coût.

Pour l'exemple donné sur cette journée d'observation, l'erreur entre les résultats issus de la reconstruction de spectre et ceux que le modèle obtient avec le spectromètre est passée de 43,3 % de sous-estimation à seulement 1,4 %. Un résultat très encourageant qui donne à croire que cette méthode est capable de rivaliser en précision avec un système de mesure de plus haute résolution.

À la suite de cette importante amélioration des performances de notre système d'analyse, d'autres observations sont nécessaires afin d'évaluer plus précisément ses capacités.

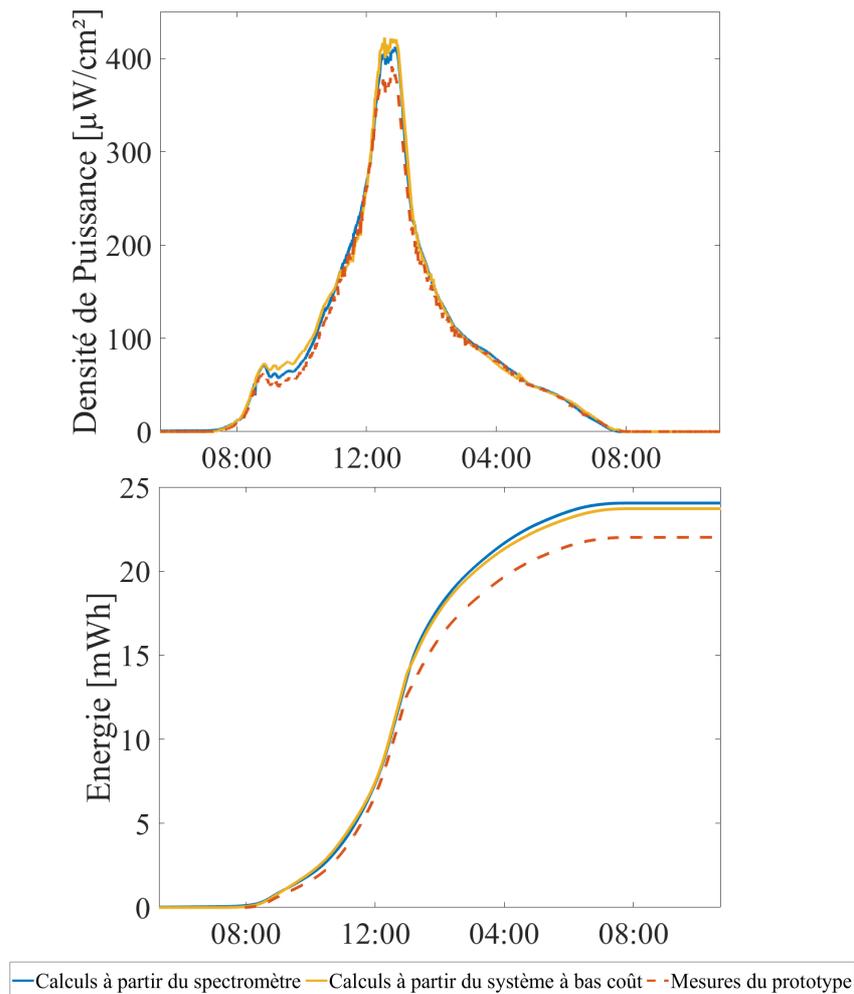


Figure 4.10 : Résultat de la méthode de reconstruction, après avoir implémenté une correction plus précise des valeurs mesurées par le système à faible coût de l'intensité lumineuse.

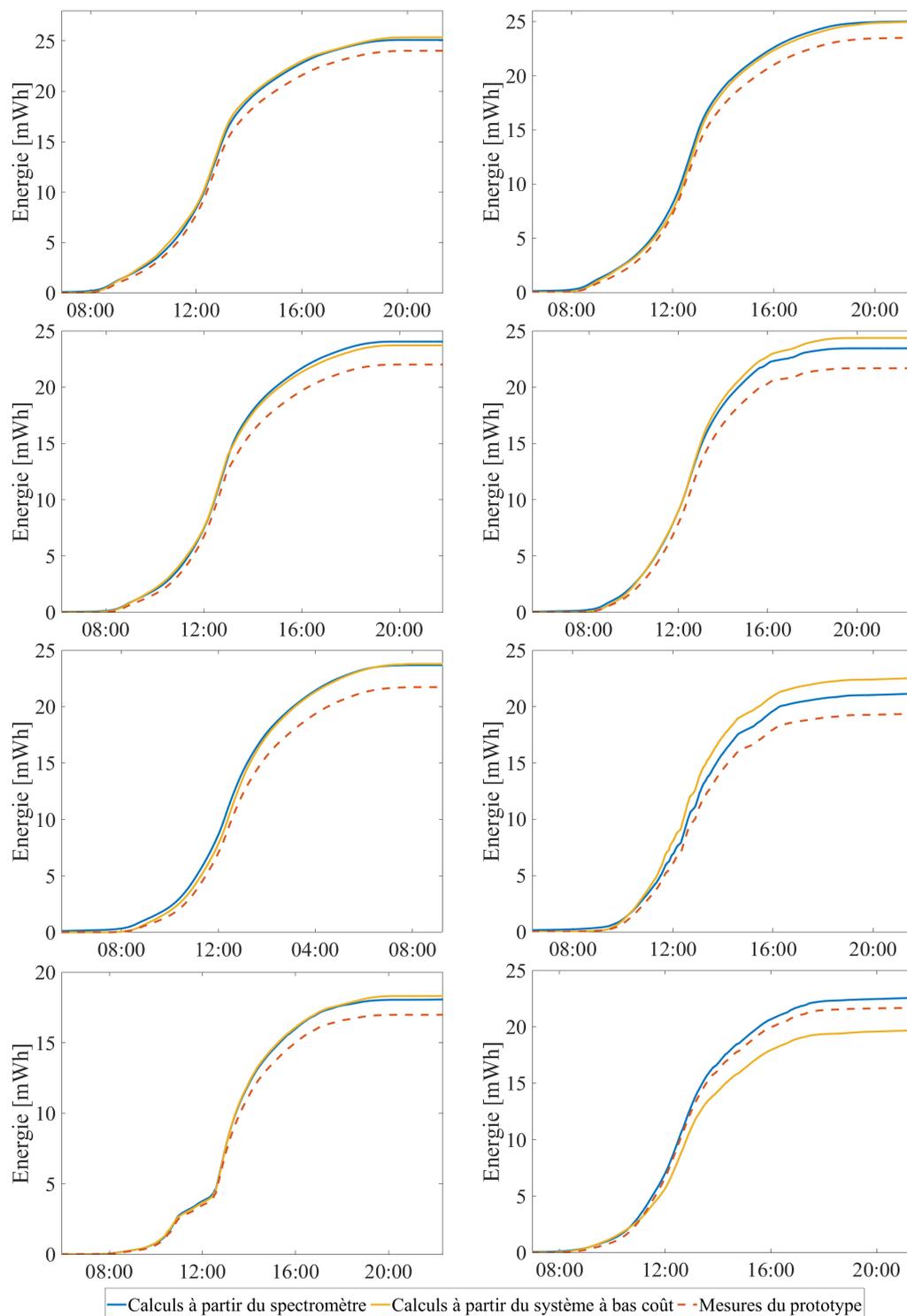
La section suivante présente donc l'étude de ces performances. Elle détaille aussi certains aspects pratiques liés à l'utilisation de la méthode d'évaluation complète de l'énergie lumineuse récupérable. Plus particulièrement, la façon dont les résultats de calculs obtenus peuvent être mis à profit pour le dimensionnement d'un récupérateur d'énergie.

4.3.3 Application finale de la méthode d'analyse

Pour démontrer que la méthode développée tout au long de ce manuscrit peut être utilisée en pratique, une série de 16 jours d'observations en environnement réel sont analysés pour estimer la surface de récupérateur d'énergie nécessaire à alimenter le système d'affichage de BAP.

a. Résultats des observations

Ces seize jours d'observation ont permis de réaliser des calculs d'énergie récupérable avec le spectromètre et avec les spectres reconstruits par le système à faible coût, ainsi des mesures de l'énergie réellement récupérable avec le prototype. Les résultats présentés dans la Figure 4.11 montrent que le modèle arrive à des valeurs de calculs proches de celles obtenues avec le spectromètre.



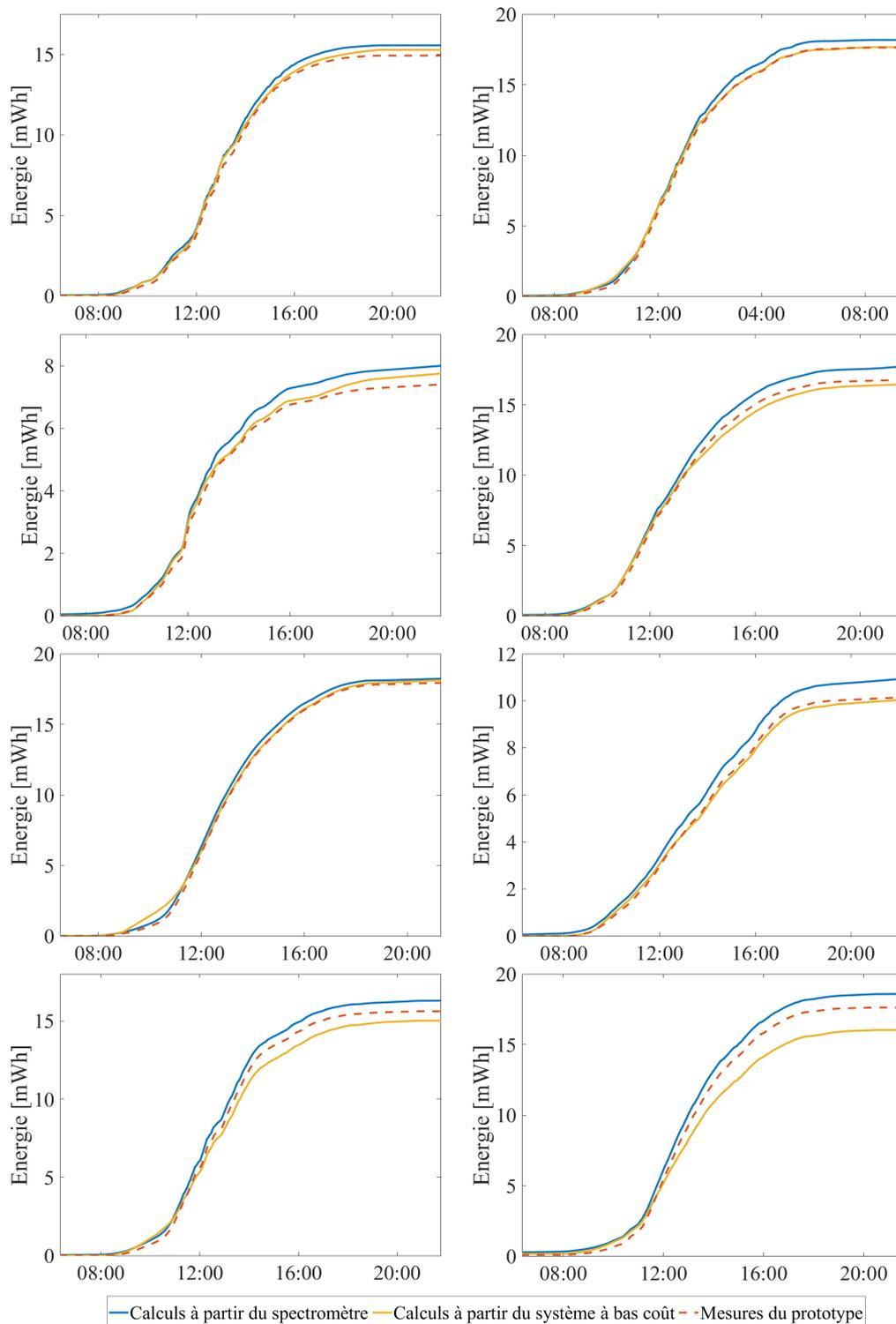


Figure 4.11 : Comparaison des résultats calculés de récupération d'énergie avec ceux mesurés sur 16 journées d'observations.

Sur l'échantillon d'observation de seize jours, le pourcentage moyen de l'erreur absolue sur la valeur d'énergie récupérable est de 3,4 % entre la méthode avec le spectromètre et celle avec le système à faible coût. Cela confirme que la méthode de classification des sources de lumière, associée à la reconstruction de spectres, permet

d'obtenir des résultats de calculs du modèle dont le niveau de précision est semblable à ceux obtenus dans le Chapitre 2 en utilisant un spectromètre.

Finalement, en comparant les résultats de calcul que le modèle obtient avec cette méthode et ceux des mesures de récupération d'énergie réelle du prototype, l'erreur moyenne est de 6,2 % (surestimation).

Ce niveau de précision, pour un système utilisant un modèle de calcul relativement simple et un dispositif de mesure à faible coût, semble un support intéressant pour aider à évaluer le dimensionnement nécessaire à un récupérateur d'énergie pour qu'il soit capable de rendre un appareil consommateur autonome.

b. Utilisation du système d'analyse en pratique

Des calculs de dimensionnement ont déjà été réalisés dans la sous-section 2.2.3 à partir des mesures de récupération réelle d'énergie effectuées par le prototype. À la suite des paragraphes précédents, il est maintenant possible de faire de même, mais cette fois à partir des résultats d'observation du système d'analyse à faible coût.

Pour qu'un utilisateur qui cherche à dimensionner un récupérateur d'énergie suffisant pour rendre autonome l'appareil de son choix puisse obtenir les résultats du système d'analyse le plus facilement, une interface graphique a été conçue (voir la Figure 4.12).

Figure 4.12 : Exemple de résultats obtenus en utilisant l'interface qui met en œuvre la méthode d'évaluation.

Cet outil a pour but de fournir des recommandations similaires à celles données dans la sous-section 2.2.3 . C'est-à-dire la surface minimum nécessaire à la compensation de l'énergie consommée par l'appareil¹.

Son utilisation est la suivante :

- Premièrement, l'utilisateur choisit l'environnement d'observation pour lequel il désire réaliser l'analyse. Les environnements disponibles correspondent à des lieux pour lesquels un jeu de données d'entraînement et des spectres de référence² ont été enregistrés, grâce à l'utilitaire créé pour cela (voir la Figure 3.23 de la sous-section 3.2.3).
- Il peut ensuite sélectionner un classifieur entraîné sur le jeu de données disponibles pour cet environnement.
- Les observations réalisées avec le dispositif de mesures à faible coût peuvent alors être chargées, une fois récupérées de la base de données du serveur. L'utilisateur a alors la possibilité de choisir un intervalle spécifique de la période d'observation qu'il souhaite évaluer.
- Il ne reste alors plus à l'utilisateur qu'à lancer l'analyse.

À partir du moment que l'analyse est lancée, le programme se charge d'appliquer la normalisation de la différence requise par le classifieur choisi. Une fois normalisées, les données de chaque observation sont traitées pour être classées parmi les sources lumineuses connues par le classifieur. Une fois cela fait, les données et leur classe permettent de réaliser la reconstruction des spectres à partir de la bibliothèque des spectres de référence disponible. Enfin, l'ensemble de ces spectres reconstitués est fourni au modèle de calcul.

Les résultats de calculs de l'énergie récupérable sont alors affichés et permettent à l'utilisateur de se faire une idée précise de l'énergie qu'il peut espérer dans l'environnement analysé. L'utilisateur peut également obtenir la surface et le nombre

¹ Pour 21 observations dans le même environnement, les résultats des mesures du prototype permettent d'estimer que dans ces conditions lumineuses, 250 cm² de cellules en GaAs (soit environ 29 cellules) serait la surface minimum nécessaire pour compenser la consommation de la tablette d'affichage de BAP.

² Dans cet exemple d'utilisation, le spectromètre reste nécessaire à l'acquisition des spectres de référence utilisés pour la reconstruction de spectres. Il est cependant envisageable que pour une bibliothèque de spectre suffisamment fournie, l'acquisition de spectre de référence par l'utilisateur ne soit plus nécessaire.

de cellules en GaAs minimum pour arriver à compenser la consommation de son appareil en renseignant sa consommation moyenne.

Pour terminer et revenir au cas de la tablette de Bureaux A Partager, le modèle de calcul associé au système d'analyse à faible coût donne une moyenne de récupération quotidienne d'énergie égale à 1,096 mWh/cm² pour les 16 jours étudiés. Pour que la puissance moyenne consommée en continu par la tablette, de 10,7 mW, soit compensée, la recommandation de surface minimale serait de 230 cm² soit 27 cellules de 8,65 cm². L'exemple d'utilisation de l'interface est donné dans la Figure 4.12 pour 5 jours d'observations. Les recommandations de surface de récupération de l'utilitaire sont un peu plus importantes que la moyenne des seize observations du fait d'un rayonnement lumineux naturel légèrement moins important.

En résumé, ces résultats démontrent que ce système d'évaluation à faible coût est capable de donner des recommandations de dimensionnement comparables à celles obtenues à l'issue du déploiement d'un prototype de récupération instrumenté. Bien que le système proposé sous-estime les besoins d'environ 7 %, cela reste une erreur raisonnable pour un dispositif dont le rôle est d'être un aide au dimensionnement des récupérateurs d'énergie.

4.4 Conclusion du chapitre

En conclusion, ce système à faible coût se présente comme une solution fiable pour évaluer l'énergie récupérable dans un environnement précis. Il ouvre une possibilité aux ingénieurs et aux chercheurs de dimensionner des récupérateurs d'énergie pour rendre leur appareil autonome dans le lieu de déploiement choisi. Ainsi, le risque de surdimensionner ou de sous-dimensionner le récupérateur est réduit, sans nécessiter la mise en œuvre de moyens importants. L'utilisation d'un système à faible coût peut alors s'avérer un gain en performance énergétique et économique et même environnementale en optimisant les surfaces de récupération d'énergie.

Pour rendre l'utilisation de cette méthode plus simple et donc plus accessible, une interface graphique, complémentaire à celles précédemment présentées (voir Figure 3.5 et Figure 3.23) a été conçue. Celle-ci permet de mettre en application la normalisation

de la différence, la reconnaissance du type de source lumineuse, la méthode de reconstruction des spectres et finalement le modèle de calcul de manière automatique.

Ces travaux montrent également que les méthodes d'apprentissage supervisé de méthode de classification offrent une alternative performante aux autres méthodes, plus conventionnelles, de caractérisation de l'environnement lumineux. Cette approche a d'ailleurs l'avantage de reposer sur un système peu coûteux et de fournir des résultats comparables à ceux obtenus avec un spectromètre.

De plus, les résultats obtenus d'observations pratiques ont démontré que rendre autonome le système d'affichage de BAP est envisageable avec une surface de cellule relativement réduite (250 cm²). La récupération d'énergie lumineuse semble donc une solution fiable pour l'alimentation en énergie d'appareil dont la consommation de puissance peut atteindre jusqu'à 10 mW en moyenne.

En décrivant l'étape finale, ce chapitre s'est également attaché à résoudre les problématiques liées à l'utilisation d'un appareil de mesure à faible coût. Des éléments de réponses ont été apportés sur les approches correctives qui peuvent être mises en œuvre pour rendre le dispositif de mesures présenté plus fiable.

Des améliorations sont envisageables pour rendre ce dispositif plus fiable encore. Les études de déviations des capteurs par rapport au spectromètre pourraient être conduites sur une plus grande gamme de source avec une résolution plus fine en intensité. Cela permettrait d'obtenir des fonctions de corrections plus juste et donc obtenir des résultats de reconstruction mieux ajustés à la réalité de l'environnement lumineux.

Pour aller plus loin encore, des tests sur des périodes plus importantes seraient nécessaires pour assurer que ce système puisse appliquer ses calculs tout au long d'une année, quelles que soient les variations lumineuses liées au changement saisonnier.

Conclusion Générale

Rendre autonomes en énergie les appareils connectés qui nous entourent devient aujourd'hui un enjeu important. Le domaine de la récupération d'énergie ambiante offre des solutions prometteuses pour y parvenir. Cependant, selon le type d'environnement dans lequel ces appareils sont déployés, les sources d'énergie ambiantes ne sont pas forcément les mêmes et la quantité d'énergie qu'elles fournissent, n'y est pas toujours égale ni constante. Les travaux présentés dans ce manuscrit ont démontré que la récupération d'énergie lumineuse a la capacité de rendre autonome un objet connecté dans un environnement de bureaux. Cette source d'énergie est même capable d'alimenter un appareil tel qu'une tablette d'affichage connectée, dont la consommation d'énergie dépasse celle des appareils communément rendus autonomes.

Dans le Chapitre 1, différentes sources d'énergie ambiante qui peuvent être prises en considération pour le développement d'un récupérateur d'énergie ont été présentées. En mettant ces sources **d'énergie dans le cadre de la récupération dans des environnements de bureaux, la récupération de l'énergie lumineuse s'est révélée être la plus favorable.** En cherchant à mieux connaître les niveaux de récupération, il a été possible de s'apercevoir que les méthodes utilisées pour caractériser l'énergie lumineuse récupérable en intérieur ne permettent pas de faire de généralisation. **Il est souhaitable qu'une méthode capable d'évaluer la quantité d'énergie récupérable dans un environnement précis soit développée.**

Le Chapitre 2 a donc présenté une méthode développée dans ce but. Celle-ci montre qu'à partir de mesures électriques et optiques, faites au préalable, sur un type de cellule, **il est possible de calculer l'énergie récupérable à partir de mesures de spectres lumineux.** Pour assurer la validité des résultats de calculs de la méthode présentée, un prototype de récupération d'énergie a été conçu pour mesurer l'énergie récupérable en pratique. Ce prototype a été développé avec des cellules en GaAs (très performantes) et dont les caractéristiques optiques et électriques ont été mesurées pour le modèle de calcul. **La comparaison des résultats de mesures de ce prototype avec ceux du modèle de calculs a permis de démontrer la validité du modèle pour ce type de cellules. Les valeurs de récupération d'énergie mesurées ont permis d'estimer qu'un**

récupérateur constitué d'une surface minimum de 250 cm² de cellules en GaAs pourrait rendre autonome la tablette d'affichage de l'entreprise Bureaux A Partager.

Le Chapitre 3 étudie une façon d'analyser l'énergie récupérable plus simple et plus polyvalente. En effet, le spectromètre utilisé pour le modèle de calcul impose certaines contraintes de fait de sa complexité d'utilisation, de traitement de données ainsi que par le temps d'utilisation limiter avant de nécessiter une nouvelle calibration. L'approche qui a été décrite consiste en un système de deux capteurs à faible coût. Pour un système opérationnel coûtant moins de 40 € (pour un prototype), ce système permet l'obtention de six indices différents, variables selon l'environnement lumineux observé. En appliquant une méthode de classification du type de source lumineuse, **il a été montré que ce dispositif à faible coût est capable de reconnaître efficacement la source principale de rayonnement lumineux dans un environnement.**

Enfin, le Chapitre 4 a décrit la méthode utilisée pour rendre les observations du moyen d'analyse à faible coût, associé aux résultats de reconnaissance du type de source utilisable par le modèle de calcul du Chapitre 2. **Cette méthode, qui consiste à reconstruire des spectres à partir des six données du système de mesure, du type de source reconnue et de spectres de référence pour cette source, à donner des résultats de calculs du modèle comparables à ceux obtenus avec le spectromètre et proches des mesures pratiques du prototype de récupération.**

Ces résultats très encourageants ont donc confirmé que l'utilisation de **ce système d'analyse à faible coût peut être un moyen fiable d'évaluation de l'énergie récupérable en pratique.** Ce système également l'avantage de pouvoir s'appuyer sur dispositif de mesure dont l'utilisation ne nécessite pas de réajustement ou de recalibration, contrairement au spectromètre utilisé dans le Chapitre 2.

Finalement, le faible coût et la polyvalence de ce système d'évaluation de l'énergie récupérable permettent d'envisager des observations sur de nombreux emplacements en simultanés. En effet, en utilisant une multitude de dispositifs de mesure identique à celui présenté, de telles campagnes de mesures seraient rendues possibles grâce à une réduction considérable de leur temps de réalisation, de leur complexité et de leur coût.

Au-delà du grand nombre de mesures réalisables en parallèle, cet outil rend également possibles des observations sur des périodes prolongées de temps. Cela permet ainsi

d'obtenir des résultats qui prennent en compte jusqu'aux variations saisonnières des sources d'énergie lumineuses et ainsi connaître, à l'échelle annuelle, l'énergie à disposition dans les environnements observés.

Finalement, les travaux présentés (résumés et illustrés par la Figure 5.1) dans ce manuscrit ont permis de valider l'ensemble de l'approche décrite, en arrivant à des résultats très encourageants de calcul de l'énergie récupérable. En outre, cette approche y parvient en utilisant différentes méthodes de calcul ou d'analyse relativement simples. Cependant, certaines limites de ces travaux permettent d'envisager des améliorations, autant du point de vue de ses performances que dans son usage. Ces limites ouvrent la voie vers de plus amples travaux sur ces sujets pour perfectionner une méthode à faible coût et à basse résolution qui s'est avérée prometteuse.

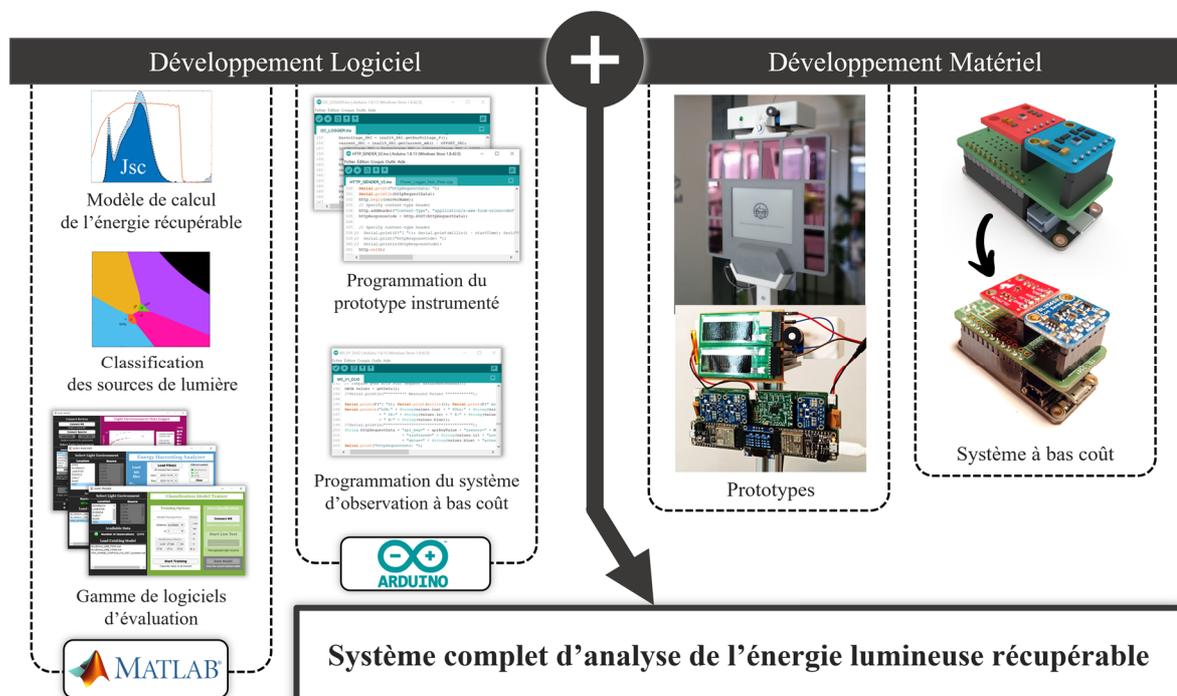


Figure 5.1 : Illustration synthétique des travaux réalisés.

Perspectives

Certaines limites des travaux présentés laissent la place à de bonnes perspectives d'amélioration de ces résultats au travers de l'optimisation de chaque brique qui constitue ce système d'analyse (modèle de calcul, classification des données, reconstruction des spectres). Ces différentes pistes pour de futurs travaux peuvent être envisagées à plus ou moins court terme. La Figure 6.1 liste ces perspectives en fonction de leur ordre respectif de développement.

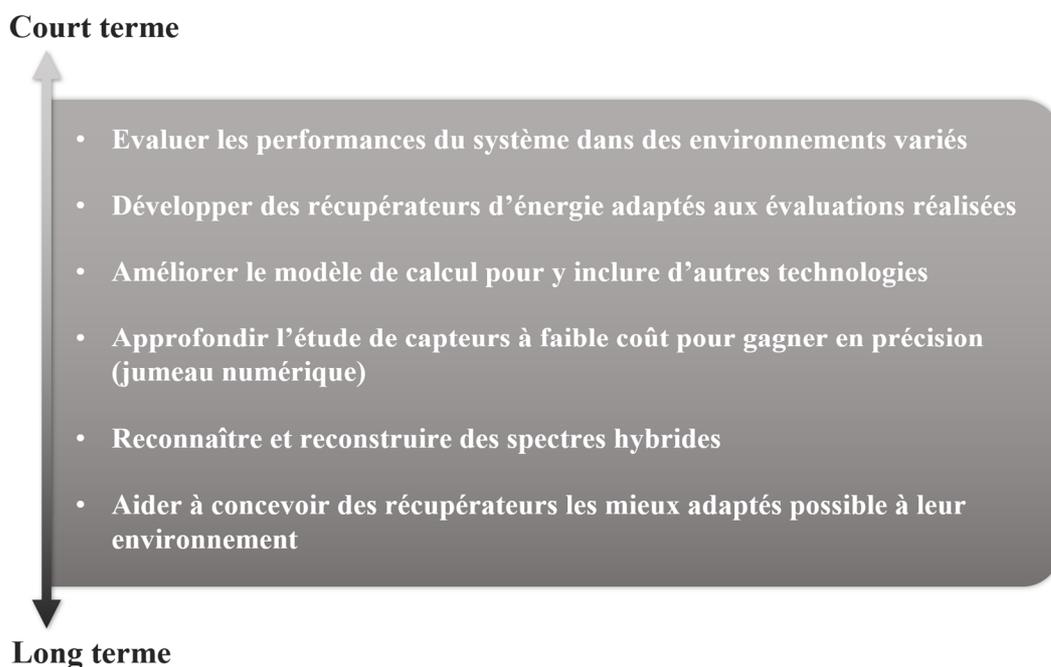


Figure 6.1 : Perspectives envisagées à plus ou moins court terme à la suite des travaux réalisés durant ce projet de thèse.

D'une part, le modèle qui a été présenté n'a été appliqué que pour un seul type de cellule photovoltaïque, les cellules en arséniure de gallium d'AltaDevices. Il serait alors intéressant d'améliorer ce modèle pour qu'il puisse prendre en compte d'autres types de convertisseurs PV. Il serait alors possible d'obtenir des calculs d'énergie récupérable du modèle pour les différentes technologies implémentées¹. Ainsi, l'utilisateur de ce système amélioré pourrait choisir, à partir des résultats de calcul, les cellules les plus performantes qui lui permettraient d'avoir un récupérateur aux plus faibles dimensions

¹ La sélection du type de cellules est déjà intégrée dans l'interface graphique présentée dans la Figure 4.12. Elle ne permet pour l'instant que de choisir les cellules GaAs, mais pourrait facilement intégrer d'autres technologies pour lesquelles le modèle serait adapté.

possible. Il pourrait également faire le choix des cellules offrant le meilleur compromis performance/prix et ainsi réduire le coût du récupérateur tout en s'assurant que la surface du récupérateur sera suffisante.

De même, un seul environnement de test a servi à l'étude des performances de ce système à faible coût et à l'analyse de l'énergie récupérable. À partir des résultats présentés il semble maintenant possible de déployer plus de ces dispositifs accompagnés de prototypes instrumentés pour valider leur fonctionnement et performances dans d'autres environnements et sur de plus longues périodes. Un tel déploiement dans les locaux de BAP permettrait, en plus de pouvoir déterminer la dimension des récupérateurs pour chaque tablette, d'avoir une connaissance plus fine des niveaux de récupération d'énergie lumineuse qui peuvent être attendus dans des environnements de bureaux.

Concernant le système de mesure, il serait intéressant de connaître son comportement vis-à-vis des sources lumineuses plus en détail afin de pouvoir améliorer ses performances. Plus particulièrement en ce qui concerne la déviation de la valeur d'intensité lumineuse. Pour cela, la réponse spectrale des capteurs utilisés pourrait être étudiée pour mieux connaître et pouvoir reproduire ce comportement en créant un jumeau digital de ces capteurs. Il serait ainsi possible de remonter plus précisément à l'intensité lumineuse. Cela permettrait d'envisager de distinguer avec plus de précision les sources de lumières, et même d'être capable de reconnaître des spectres dont la composition est hybridée à partir de plusieurs sources de types différents.

Jusqu'ici, pour réaliser l'entraînement des classificateurs, la reconstruction des spectres et finalement pour utiliser le modèle de calcul, un ordinateur équipé de *MATLAB* était utilisé. Il est cependant envisageable que ce système soit déployé directement sur le dispositif de mesure à faible coût. La relative simplicité de notre méthode et le nombre de données à traiter étant beaucoup plus faible que celles provenant d'un spectromètre, le microcontrôleur utilisé jusqu'ici pour les tâches d'acquisition et d'envoi des données pourrait avoir la puissance suffisante pour réaliser cette nouvelle tâche. Il serait d'ailleurs possible de chercher à réduire le coût en puissance et en temps de calcul en cherchant une méthode optimale de reconnaissance du type de source lumineuse pour un système embarqué. Cette méthode devrait conjuguer des performances de classification importantes avec le nombre de paramètres le plus faible possible et dont les entraînements seraient les plus rapides à réaliser ainsi qu'à utiliser.

Aujourd'hui, deux choix s'imposent à une personne désireuse d'équiper un appareil d'un récupérateur d'énergie lumineuse. D'une part, choisir d'utiliser un système de mesure coûteux et complexe à mettre en œuvre, mais dont les résultats sont extrêmement fiables, ou d'autre part, faire le choix de ne pas réaliser de mesures et surdimensionner le récupérateur en estimant de manière approximative l'énergie récupérable et risquer d'obtenir des résultats peu fiables. En appliquant les améliorations décrites précédemment, le faible coût, la polyvalence et la fiabilité du système de mesure présenté offriraient à son utilisateur une alternative avantageuse.

Références

- [1] Amy Nordrum, “The Internet of Fewer Things,” *Spectrum.IEEE.Org*, pp. 12–13, 2016.
- [2] T. Alam, “A Reliable Communication Framework and Its Use in Internet of Things (IoT),” *Int. J. Sci. Res. Comput. Sci. Eng. Inf. Technol.* © 2018 IJSRCSEIT, vol. 5, no. 10, pp. 450–456, 2018.
- [3] R. Arshad, S. Zahoor, M. A. Shah, A. Wahid, and H. Yu, “Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond,” *IEEE Access*, vol. 5, no. c, pp. 15667–15681, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2686092.
- [4] W. S. Wang, T. O’Donnell, L. Ribetto, B. O’Flynn, M. Hayes, and C. O’Mathuna, “Energy harvesting embedded wireless sensor system for building environment applications,” *Proc. 2009 1st Int. Conf. Wirel. Commun. Veh. Technol. Inf. Theory Aerosp. Electron. Syst. Technol. Wirel. VITAE 2009*, pp. 36–41, 2009, doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172418.
- [5] S. D. T. Kelly, N. K. Suryadevara, and S. C. Mukhopadhyay, “Towards the Implementation of IoT for Environmental Condition Monitoring in Homes,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853, 2015, doi: 10.1109/JSEN.2013.2263379.
- [6] X. Yue *et al.*, “Development of an Indoor Photovoltaic Energy Harvesting Module for Autonomous Sensors in Building Air Quality Applications,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 4, no. 6, pp. 2092–2103, 2017, doi: 10.1109/JIOT.2017.2754981.
- [7] I. Mathews, S. N. Kantareddy, T. Buonassisi, and I. M. Peters, “Technology and Market Perspective for Indoor Photovoltaic Cells,” *Joule*, vol. 3, no. 6, pp. 1415–1426, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.03.026.
- [8] W. S. Wang, T. O’Donnell, N. Wang, M. Hayes, B. O’Flynn, and C. O’Mathuna, “Design considerations of sub-mw indoor light energy harvesting for wireless sensor systems,” *ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst.*, vol. 6, no. 2, 2010, doi: 10.1145/1773814.1773817.
- [9] C. Carvalho and N. Paulino, “On the Feasibility of Indoor Light Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks,” *Procedia Technol.*, vol. 17, pp. 343–350, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2014.10.206.
- [10] R. A. Kjellby, T. E. Johnsrud, S. E. Loetveit, L. R. Cenkeramaddi, M. Hamid, and B. Beferull-Lozano, “Self-Powered IoT Device for Indoor Applications,” *Proc. IEEE Int. Conf. VLSI Des.*, vol. 2018-Janua, pp. 455–456, 2018, doi: 10.1109/VLSID.2018.110.
- [11] J. F. Randall, “On the use of photovoltaic ambient energy sources for powering indoor electronic devices,” EPFL, Lausanne, 2003.
- [12] F. K. Shaikh and S. Zeadally, “Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- [13] P. Trzcinski, A. Nathan, and V. Karanassios, “Approaches to energy harvesting and energy scavenging for energy autonomous sensors and microinstruments,” *Micro- Nanotechnol. Sensors, Syst. Appl. IX*, vol. 10194, p. 1019431, 2017, doi: 10.1117/12.2262957.
- [14] EnOcean, “Energy harvester ECO 200 Datasheet,” no. January, p. 2014, 2014.
- [15] S. Roundy and P. K. Wright, “A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 5, pp. 1131–1142, 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/5/018.
- [16] D. Zhu, S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. R. Harris, “A credit card sized self powered smart sensor node,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 169, no. 2, pp. 317–325, 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.01.015.
- [17] “www.Smart-Material.com.” <https://www.smart-material.com/>.
- [18] “www.piezo.com.” <https://piezo.com/>.

- [19] J. Chen *et al.*, “Harmonic-resonator-based triboelectric nanogenerator as a sustainable power source and a self-powered active vibration sensor,” *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 42, pp. 6094–6099, 2013, doi: 10.1002/adma.201302397.
- [20] F. U. Khan and M. U. Qadir, “State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 26, no. 10, p. 103001, 2016, doi: 10.1088/0960-1317/26/10/103001.
- [21] Conseil National du Bruit, “Guide du CNB Réglementations acoustiques des bâtiments,” 2017. [Online]. Available: http://normativa.infocentre.es/sites/normativa.infocentre.es/files/noticies/IEE_2016.pdf.
- [22] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,” *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 11, pp. 1131–1144, 2003, doi: 10.1016/S0140-3664(02)00248-7.
- [23] S. Roundy, P. K. Wright, and J. M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*. Boston, MA: Springer US, 2004.
- [24] X. Niu, J. Yu, and S. Wang, “Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator,” *J. Power Sources*, vol. 188, no. 2, pp. 621–626, 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.067.
- [25] G. Sebald, D. Guyomar, and A. Agbossou, “On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 12, 2009, doi: 10.1088/0964-1726/18/12/125006.
- [26] X. Lu and S. H. Yang, “Thermal energy harvesting for WSNs,” *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, pp. 3045–3052, 2010, doi: 10.1109/ICSMC.2010.5641673.
- [27] A. Nozariasbmarz *et al.*, “High Power Density Body Heat Energy Harvesting,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 43, pp. 40107–40113, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b14823.
- [28] A. L. Cottrill *et al.*, “Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting,” *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03029-x.
- [29] P. Kamalinejad, C. Mahapatra, Z. Sheng, S. Mirabbasi, V. C. Victor, and Y. L. Guan, “Wireless energy harvesting for the Internet of Things,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 6, pp. 102–108, 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7120024.
- [30] “PowerCast Corp.” <https://www.powercastco.com/>.
- [31] S. Cao and J. Li, “A survey on ambient energy sources and harvesting methods for structural health monitoring applications,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1177/1687814017696210.
- [32] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, and P. Carter, “A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 8, pp. 3486–3495, 2015, doi: 10.1109/TAP.2015.2431719.
- [33] T. Ajmal, V. Dyo, B. Allen, D. Jazani, and I. Ivanov, “Design and optimisation of compact RF energy harvesting device for smart applications,” *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 2, pp. 111–113, 2014, doi: 10.1049/el.2013.3434.
- [34] U. Olgun, C. C. Chen, and J. L. Volakis, “Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system,” *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 6, no. 11, pp. 1200–1206, 2012, doi: 10.1049/iet-map.2012.0129.
- [35] J. H. Chou, D. B. Lin, K. L. Weng, and H. J. Li, “All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 10, pp. 5242–5249, 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2340895.
- [36] Y. Shi, J. Jing, Y. Fan, L. Yang, and M. Wang, “Design of a novel compact and efficient rectenna for WiFi energy harvesting,” *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 83, no. April, pp. 57–70, 2018, doi: 10.2528/pierc18012803.
- [37] www.radiofrequences.gouv.fr, “Les niveaux d’exposition.”

<http://www.radiofrequences.gouv.fr/les-niveaux-d-exposition-a73.html>.

- [38] E. Chiaramello *et al.*, “Radio frequency electromagnetic fields exposure assessment in indoor environments: A review,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 6, 2019, doi: 10.3390/ijerph16060955.
- [39] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz),” *Health Phys.*, vol. 74, no. 4, pp. 494–521, 1998, Accessed: Oct. 10, 2020. [Online]. Available: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10011773744/en/>.
- [40] Y. Zhang, S. Shen, C. Y. Chiu, and R. Murch, “Hybrid rf-solar energy harvesting systems utilizing transparent multiport micromeshed antennas,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 67, no. 11, pp. 4534–4546, 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2930507.
- [41] IXYS Corporation, “High Efficiency SolarMD.,” no. 408, pp. 1–6, 2016.
- [42] M. A. Green, “How Did Solar Cells Get So Cheap?,” *Joule*, vol. 3, no. 3, pp. 631–633, 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.02.010.
- [43] H. Maurus, M. Schmid, B. Bleresch, P. Lechner, and H. Schade, “PV for BUILDINGS - Benefits and experiences with amorphous silicon in BIPV applications,” *Refocus*, vol. 5, no. 6, pp. 22–27, 2004, doi: 10.1016/S1471-0846(04)00255-0.
- [44] M. A. Green, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, and A. W. Y. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 54),” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 7, pp. 565–575, 2019, doi: 10.1002/pip.3171.
- [45] I. Mathews, G. Kelly, P. J. King, and R. Frizzell, “GaAs solar cells for Indoor Light Harvesting,” *2014 IEEE 40th Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 0510–0513, 2014, doi: 10.1109/PVSC.2014.6924971.
- [46] M. Freitag *et al.*, “Dye-sensitized solar cells for efficient power generation under ambient lighting,” *Nat. Photonics*, vol. 11, no. 6, pp. 372–378, 2017, doi: 10.1038/nphoton.2017.60.
- [47] Y. W. Noh, I. S. Jin, K. S. Kim, S. H. Park, and J. W. Jung, “Reduced energy loss in SnO₂/ZnO bilayer electron transport layer-based perovskite solar cells for achieving high efficiencies in outdoor/indoor environments,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 8, no. 33, pp. 17163–17173, 2020, doi: 10.1039/d0ta04721j.
- [48] E. H. Jung *et al.*, “Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene),” *Nature*, vol. 567, no. 7749, pp. 511–515, 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1036-3.
- [49] X. Jiang, J. Polastre, and D. Culler, “Perpetual environmentally powered sensor networks,” *2005 4th Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2005*, vol. 2005, pp. 463–468, 2005, doi: 10.1109/IPSN.2005.1440974.
- [50] P. Corke and T. Wark, “Long-Duration Solar-powered Wireless Sensor Networks,” pp. 33–37, 2007.
- [51] J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, “Design, modeling and capacity planning for micro-solar power sensor networks,” *Proc. - 2008 Int. Conf. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2008*, pp. 407–418, 2008, doi: 10.1109/IPSN.2008.67.
- [52] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, and M. Srivastava, “Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems,” *2005 4th Int. Symp. Inf. Process. Sens. Networks, IPSN 2005*, vol. 2005, pp. 457–462, 2005, doi: 10.1109/IPSN.2005.1440973.
- [53] C. Park and P. H. Chou, “AmbiMax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes,” *2006 3rd Annu. IEEE Commun. Soc. Sens. Adhoc Commun. Networks, Secon 2006*, vol. 1, no. c, pp. 168–177, 2006, doi: 10.1109/SAHCN.2006.288421.
- [54] J. F. Randall, “On the use of photovoltaic ambient energy sources for powering indoor electronic devices,” 2003.
- [55] P. Spies, M. Pollak, and L. Mateu, *Handbook of energy harvesting power supplies and*

- applications. 2015.
- [56] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, "Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 31, no. 6, pp. 420–432, 2007, doi: 10.1016/j.micpro.2007.02.006.
- [57] Y. Afsar, J. Sarik, M. Gorlatova, G. Zussman, and I. Kymissis, "Evaluating photovoltaic performance indoors," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 1948–1951, 2012, doi: 10.1109/PVSC.2012.6317977.
- [58] M. Rasheduzzaman, P. B. Pillai, A. N. C. Mendoza, and M. M. De Souza, "A study of the performance of solar cells for indoor autonomous wireless sensors," *2016 10th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP 2016*, pp. 8–13, 2016, doi: 10.1109/CSNDSP.2016.7574001.
- [59] C. A. Reynaud, R. Clerc, P. B. Lechêne, M. Hébert, A. Cazier, and A. C. Arias, "Evaluation of indoor photovoltaic power production under directional and diffuse lighting conditions," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 200, no. January, p. 110010, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.110010.
- [60] Y. K. Tan and S. K. Panda, "Energy harvesting from hybrid indoor ambient light and thermal energy sources for enhanced performance of wireless sensor nodes," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4424–4435, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2102321.
- [61] H. Yu, Q. Yue, J. Zhou, and W. Wang, "A hybrid indoor ambient light and vibration energy harvester for wireless sensor nodes," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 5, pp. 8740–8755, 2014, doi: 10.3390/s140508740.
- [62] I. Mathews, P. J. King, F. Stafford, and R. Frizzell, "Performance of III-V solar cells as indoor light energy harvesters," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 1, pp. 230–235, 2016, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2487825.
- [63] A. S. Teran *et al.*, "AlGaAs Photovoltaics for Indoor Energy Harvesting in mm-Scale Wireless Sensor Nodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 7, pp. 2170–2175, 2015, doi: 10.1109/TEDE.2015.2434336.
- [64] J. F. Randall and J. Jacot, "Is AM1.5 applicable in practice? Modelling eight photovoltaic materials with respect to light intensity and two spectra," *Renew. Energy*, vol. 28, no. 12, pp. 1851–1864, 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00068-5.
- [65] K. Ruhle and M. Kasemann, "Approaching high efficiency wide range silicon solar cells," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, no. 1, pp. 2651–2654, 2013, doi: 10.1109/PVSC.2013.6745018.
- [66] M. F. Müller, M. Freunek, and L. M. Reindl, "Maximum efficiencies of indoor photovoltaic devices," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 1, pp. 59–64, 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2225023.
- [67] J. F. Randall, "On the use of photovoltaic ambient energy sources for powering indoor electronic devices," 2003, [Online]. Available: <http://infoscience.epfl.ch/record/87589>.
- [68] S. Bader, X. Ma, and B. Oelmann, "One-diode photovoltaic model parameters at indoor illumination levels – A comparison," *Sol. Energy*, vol. 180, no. January, pp. 707–716, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.01.048.
- [69] M. Müller, J. Wienold, W. D. Walker, and L. M. Reindl, "Characterization of indoor photovoltaic devices and light," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 000738–000743, 2009, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411178.
- [70] J. Sarik, K. Kim, M. Gorlatova, I. Kymissis, and G. Zussman, "More than meets the eye - A portable measurement unit for characterizing light energy availability," *2013 IEEE Glob. Conf. Signal Inf. Process. Glob. 2013 - Proc.*, pp. 387–390, 2013, doi: 10.1109/GlobalSIP.2013.6736896.
- [71] A. Sacco, L. Rolle, L. Scaltrito, E. Tresso, and C. F. Pirri, "Characterization of photovoltaic modules for low-power indoor application," *Appl. Energy*, vol. 102, pp. 1295–1302, 2013, doi:

- 10.1016/j.apenergy.2012.07.001.
- [72] Y. Cao, Y. Liu, S. M. Zakeeruddin, A. Hagfeldt, and M. Grätzel, “Direct Contact of Selective Charge Extraction Layers Enables High-Efficiency Molecular Photovoltaics,” *Joule*, vol. 2, no. 6, pp. 1108–1117, 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.03.017.
- [73] S. Biswas and H. Kim, “Solar cells for indoor applications: Progress and development,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 1338, 2020, doi: 10.3390/POLYM12061338.
- [74] B. Minnaert and P. Veelaert, “WHICH TYPE of solar cell is best for low power indoor devices ?,” *Innov. Sustain. Prod.*, pp. 8–12, 2010.
- [75] G. Apostolou, A. Reinders, and M. Verwaal, “Comparison of the indoor performance of 12 commercial PV products by a simple model,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 69–85, 2016, doi: 10.1002/ese3.110.
- [76] F. De Rossi, T. Pontecorvo, and T. M. Brown, “Characterization of photovoltaic devices for indoor light harvesting and customization of flexible dye solar cells to deliver superior efficiency under artificial lighting,” *Appl. Energy*, vol. 156, pp. 413–422, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.031.
- [77] M. Kasemann, J. Kokert, S. M. Torres, K. Ruhle, and L. M. Reindl, “Monitoring of indoor light conditions for photovoltaic energy harvesting,” 2014, doi: 10.1109/SSD.2014.6808770.
- [78] Y. Li, N. J. Grabham, S. P. Beeby, and M. J. Tudor, “The effect of the type of illumination on the energy harvesting performance of solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 111, pp. 21–29, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.10.024.
- [79] B. Minnaert and P. Veelaert, “A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications,” *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1500–1516, 2014, doi: 10.3390/en7031500.
- [80] A. Hande, T. Polk, W. Walker, and D. Bhatia, “Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes,” *Microprocess. Microsyst.*, vol. 31, no. 6, pp. 420–432, 2007, doi: 10.1016/j.micpro.2007.02.006.
- [81] G. Apostolou, A. Reinders, and M. Verwaal, “Comparison of the indoor performance of 12 commercial PV products by a simple model,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 69–85, 2016, doi: 10.1002/ese3.110.
- [82] C. Carvalho and N. Paulino, “On the feasibility of indoor light energy harvesting for wireless sensor networks,” *Procedia Technol.*, vol. 17, pp. 343–350, 2014.
- [83] Y. Li, N. J. Grabham, S. P. Beeby, and M. J. Tudor, “The effect of the type of illumination on the energy harvesting performance of solar cells,” *Sol. Energy*, vol. 111, pp. 21–29, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.10.024.
- [84] X. Ma, S. Bader, and B. Oelmann, “Characterization of indoor light conditions by light source classification,” *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 12, pp. 3884–3891, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2699330.
- [85] B. Minnaert and P. Veelaert, “A proposal for typical artificial light sources for the characterization of indoor photovoltaic applications,” *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1500–1516, 2014, doi: 10.3390/en7031500.
- [86] M. Müller, J. Wienold, W. D. Walker, and L. M. Reindl, “Characterization of indoor photovoltaic devices and light,” in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2009, pp. 000738–000743, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411178.
- [87] W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells,” *J. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 3, pp. 510–519, 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
- [88] M. A. Green, *Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications, Operating Principles, Technology and System Applications ed. Kensington, Australia: Univ. University of New South Wales*, 1986.

- [89] B. M. Kayes *et al.*, “27.6% Conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 000004–000008, 2011, doi: 10.1109/PVSC.2011.6185831.
- [90] N. H. Reich *et al.*, “Crystalline silicon cell performance at low light intensities,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 9, pp. 1471–1481, 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2009.03.018.
- [91] A. S. Teran *et al.*, “Energy Harvesting for GaAs Photovoltaics under Low-Flux Indoor Lighting Conditions,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2820–2825, 2016, doi: 10.1109/TED.2016.2569079.
- [92] F. A. Lindholm, J. G. Fossum, and E. L. Burgess, “Application of the superposition principle,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 26, no. 3, pp. 165–171, 1979, doi: 10.1119/1.2343232.
- [93] N. G. Tarr and D. L. Pulfrey, “The Superposition Principle for Homojunction Solar Cells,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 27, no. 4, pp. 771–776, 1980, doi: 10.1109/T-ED.1980.19935.
- [94] Analog Devices, “ADP5090 Datasheet,” 2015, [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP5090.pdf>.
- [95] NXP, “PCA9420 - Power management IC for low-power microcontroller applications,” no. October, pp. 1–80, 2019.
- [96] Texas Instruments, “Bq25570 Nano Power Boost Charger and Buck Converter,” no. V, p. 45, 2019.
- [97] S. Motahhir, A. El Hammoumi, and A. El Ghzizal, “The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm,” *J. Clean. Prod.*, vol. 246, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118983.
- [98] A. S. Weddell, G. V. Merrett, and B. M. Al-Hashimi, “Photovoltaic sample-and-hold circuit enabling MPPT indoors for low-power systems,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 59, no. 6, pp. 1196–1204, 2012, doi: 10.1109/TCSI.2011.2173393.
- [99] E-PEAS, “Highly-efficient Regulated Dual-Output, Ambient Energy Manager for DC or AC sources with optional primary battery,” pp. 3–6, 2018.
- [100] V. Lo Brano, A. Orioli, G. Ciulla, and A. Di Gangi, “An improved five-parameter model for photovoltaic modules,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 8, pp. 1358–1370, 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.003.
- [101] X. Ma, S. Bader, and B. Oelmann, “Power Estimation for Indoor Light Energy Harvesting Systems,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 9456, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tim.2020.2984145.
- [102] TAOS, “Datasheet - TSL2561,” no. March, pp. 1–42, 2009, [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>.
- [103] RENESAS, “Datasheet - ISL29125,” 2017.
- [104] J. A. Shine and D. B. Carr, “A comparison of classification methods for large imagery data sets,” *Jsm*, no. October, pp. 3205–3207, 2002.
- [105] H. Michaels *et al.*, “Dye-sensitized solar cells under Ambient Light Powering Machine Learning: Towards autonomous smart sensors for Internet of Things,” *Chem. Sci.*, vol. 11, no. 11, 2020, doi: 10.1039/c9sc06145b.
- [106] P. S. A. Beck, C. Atzberger, K. A. Høgda, B. Johansen, and A. K. Skidmore, “Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 100, no. 3, pp. 321–334, 2006, doi: 10.1016/j.rse.2005.10.021.

Communications

Publications :

B. Politi, S. Parola, A. Gademer, D. Pegart, M. Piquemil, A. Foucaran, N. Camara,
“Practical energy harvesting under real indoor lightning conditions”,
Solar Energy, vol. 224, no. August, pp. 3–9, 2021,
 doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.084>

Communication Orales :

B. Politi, S. Parola, A. Gademer, M. Piquemil, A. Foucaran, N. Camara,
“Micro-sources d’énergie ‘indoor’ pour objets nomades énergétiquement autonomes”,
Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique (JNRDM), 2019

B. Politi, S. Parola, A. Gademer, M. Piquemil, A. Foucaran, N. Camara,
“Practical Energy Harvesting Under Real Indoor Lightning Conditions”,
European PV Solar Energy Conference (EU PVSEC), 2019

B. Politi, S. Parola, A. Gademer, A. Foucaran, M. Piquemil, N. Camara,
“Energy Harvestable in Real Indoor Lightning Conditions”,
Journées Nationales du PhotoVoltaïque (JNPV), 2019

Posters :

B. Politi, A. Foucaran, M. Piquemil, N. Camara,
“Harvesting indoor light to supply power to nomad embedded systems”,
Journées Nationales de la Récupération et du Stockage de l’Energie (JNRSE), 2018

B. Politi, S. Parola, A. Foucaran, M. Piquemil, N. Camara,
“PV Efficiency and Ideal Band Gap Estimation in Real Indoor Environments”,
Journées Nationales du PhotoVoltaïque (JNPV), 2018

(Abstract accepté, participation annulée [Covid-19])

B. Politi, S. Parola, A. Foucaran, M. Piquemil, N. Camara,
“Low-cost and low-tech estimation system for indoor light energy harvesting”,
PV Specialists Conference (PVSC), 2020

Annexes

Les codes développés pour le prototype instrumenté et le dispositif de mesure à faible coût sont disponibles¹ sur le compte GitHub de Bastien POLITI. Les fichiers de fabrications des équipements décrits dans ce manuscrit sont également disponibles sur ce compte (circuits imprimés, etc.).

github.com/bpoliti/Ph.D-Thesis

En ce qui concerne les codes de calculs du modèle développé ainsi que les interfaces graphiques créées, ceux-ci ne sont disponibles que sur demande directe à l'auteur ou à l'organisme dont ces éléments sont la propriété intellectuelle.

Ces codes sont la propriété intellectuelle de l'Université de Montpellier et peuvent être reproduits uniquement avec son autorisation.

¹ Ce répertoire n'est pas public et nécessite l'autorisation de l'auteur pour y accéder. Pour toutes demandes d'accès, envoyez un courrier à l'adresse suivante : bastien.politi@gmail.com

Table des Figures

Figure 0.1 : La tablette Joan, communicante (Wifi), commercialisée par Visionect, permet d'afficher l'état de réservation de salle de réunion ou d'autres salles partagées. Équipée d'un écran à encre électronique, sa consommation de puissance électrique moyenne est de l'ordre d'une dizaine de milliwatts.....	2
Figure 1.1 : Deux solutions commerciales de récupérateur d'énergie mécanique. (a) Récupérateur d'énergie mécanique EnOcean (interrupteur) (b) Récupérateur d'énergie vibratoire Perpetuum (>1000 €).	9
Figure 1.2 : Prototypage de convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique utilisant l'effet piézoélectrique optimisée pour une fréquence de vibration de 120 Hz [15].	10
Figure 1.3 : Récupérateur d'énergie vibratoire développé par Zhu et coll. [16] de la dimension d'une carte de crédit.....	11
Figure 1.4 : (a) Dispositifs piézoélectriques vendus par SmartMaterial [17]. (b) Convertisseurs piézoélectriques vendus par PIEZO.COM [18].	12
Figure 1.5 : (a) Générateur thermoélectrique typique commercialisé, (b) Vue éclatée d'un système thermoélectrique.	15
Figure 1.6 : Dispositif thermoélectrique utilisé par Nozariasbmarz et coll. [27] pour récupérer l'énergie à partir d'un faible gradient de température entre le corps humain et l'air ambiant.....	15
Figure 1.7 : Système de Cottrill et coll. permettant de récupérer l'énergie des variations à basse fréquence (mHz) de l'environnement [28].....	16
Figure 1.8 : Système de transmission d'énergie sans fil vendu par PowerCast. À gauche : l'émetteur d'ondes radiofréquence avec son bloc d'alimentation. À droite : différents récupérateurs d'énergie RF émise par l'émetteur.....	18
Figure 1.9 : Exemple de récupérateur d'énergie radiofréquence pour réseau de capteurs. Celui-ci a permis la récupération de 240 μ W à une distance de 22,5 km d'un émetteur de 150 kW rayonnant en onde moyenne (MW) à 900 kHz [33].	19
Figure 1.10 : Design d'un récupérateur d'énergie à partir d'onde Wifi (2.45 GHz). (a) Géométrie proposée pour l'antenne. (b) Design du redresseur associé à l'antenne. (Source : Olgun et coll., 2012)	20
Figure 1.11 : Récupérateur d'énergie hybride (lumière/RF) exposé à un rayonnement RF (100 μ W) [40].....	21
Figure 1.12 : Module PV fabriqué par le groupe IXYS constitué de 4 cellules photovoltaïques en silicium monocristallin montées en série (dimensions : 43 mm x 14 mm ; surface : 6 cm ²).....	23
Figure 1.13 : Cellule PV de type couche mince de 2 ^e génération en arséniure de gallium (GaAs) fabriquée par l'entreprise AltaDevices. Ce type de cellule a la particularité de pouvoir être flexible selon le procédé de fabrication ou le substrat employé.	24

Figure 1.14 : Modules à base de cellules pérovskite stable, performante et ayant une surface de 24,97 cm ² fabriquée par Jung et coll. [48].	24
Figure 1.15 : Exemples de systèmes fonctionnant grâce à la récupération d'énergie solaire (a) Projet Prometheus de Jiang et coll. [49] (b) Heliomote de Raghunathan et coll. [52] (c) et (d) Projet Ambimax qui récupère aussi l'énergie éolienne à l'aide d'une turbine [53].	25
Figure 1.16 : Comparaison du spectre d'irradiance de 3 sources de lumière différentes pour le même niveau d'intensité lumineuse ressenti par l'œil humain.	32
Figure 2.1 : Caractéristique courant-tension d'une jonction P-N et de différents paramètres observables utiles aux calculs de ses performances.	41
Figure 2.2 : Efficacité théorique maximale de conversion $\eta_{SQ}(Eg)$ pour une cellule à simple jonction p-n idéale basée sur le modèle SQ exposée à différentes sources de lumière : CFL, LED, et lumière naturelle venant d'une fenêtre. Les points représentent les efficacités mesurées de trois différentes technologies de convertisseurs PV sous les rayonnements CFL et LED équivalents à 500 lux.	42
Figure 2.3 : Exemples de caractéristiques de densité de courant en fonction de la tension ($J-V$) et de densité de puissance ($P-V$) mesurées expérimentalement sur les cellules en GaAs, sous différentes intensités d'éclairage d'une lampe à LED (à gauche) et d'une lampe CFL (à droite).	44
Figure 2.4 : Évolution du facteur de remplissage (FF) de cellules théoriquement idéales en fonction de l'intensité lumineuse d'une lampe à LED, comparées à la même évolution mesurée pour des convertisseurs PV commerciaux (GaAs ; a-Si:H et pc-Si).	45
Figure 2.5 : Schéma du modèle de calcul détaillant les mesures nécessaires à l'obtention des calculs de la puissance et de l'énergie récupérable dans l'environnement observé avec la technologie de convertisseur PV choisie.	47
Figure 2.6 : Spectromètre optique utilisé pour l'acquisition des données de composition spectrale de l'environnement lumineux nécessaires aux calculs du modèle.	48
Figure 2.7 : Illustration du calcul réalisé par le modèle de la densité de courant de court-circuit J_{SC} générée par une cellule en GaAs lorsqu'elle est soumise à 300 lux d'un spectre irradié par une lampe à LED.	49
Figure 2.8 : Illustration du calcul de la caractéristique de la densité de courant en fonction de la tension $J_{mod}-V$ (trait bleu plein) de la cellule GaAs effectué par le modèle, sous un éclairage à LED (3000K). En additionnant la valeur de J_{SC} à la caractéristique en densité de courant dans l'obscurité $J_{darkmeas}-V$ de la cellule en GaAs (en pointillés bleus). En pointillés orange, la caractéristique expérimentale mesurée.	50
Figure 2.9 : Comparaison entre des exemples résultats de calcul du modèle (en bleu) et des mesures expérimentales (en pointillés orange) sur les cellules GaAs. À gauche : la densité de courant en fonction de la tension $J-V$ et de la densité de puissance en fonction de la tension $P-V$ sous un éclairage LED. À droite : sous l'éclairage d'une lampe CFL).	51
Figure 2.10 : Schéma du prototype de récupération d'énergie instrumenté. Flèches bleues : énergie produite par les cellules PV. Blocs bleus : éléments actifs de la chaîne de récupération. Le PMIC extrait et conditionne l'énergie pour la stocker dans la batterie. Batterie dans laquelle l'appareil vient consommer. Blocs verts : capteur de puissance.	

Bloc jaune : système de récupération des données de mesures qui les transmet à la base de données (cylindre gris) par wifi.	53
Figure 2.11 : Efficacité du PMIC AEM10941 fabriqué par E-PEAS en fonction de la tension de récupération applicable au convertisseur PV pour une tension de recharge de la batterie de 4,1 V. Les trois courbes représentent l'efficacité du système pour différents courants de récupération.	54
Figure 2.12 : Illustration du calcul de la fraction de la tension de circuit ouvert (FOCV).	55
Figure 2.13 : Schéma fonctionnel simplifié du PMIC AEM10941 fabriqué par E-PEAS [99].	56
Figure 2.14 : Circuit imprimé développé pour assembler le prototype instrumenté de récupération d'énergie lumineuse.	59
Figure 2.15 : Carte de récupération d'énergie instrumentée une fois assemblée. Elle embarque le PMIC, les deux microcontrôleurs chargés de réceptionner les données des trois capteurs de puissances et un écran OLED.	59
Figure 2.16 : Prototype assemblé, alimenté par deux cellules en GaAs (haut de l'image) et qui stocke l'énergie qu'elles produisent dans la batterie (à gauche de l'image). Un appareil tel que la tablette Joan peut y être branché en le reliant au connecteur à l'extrémité supérieure gauche du circuit imprimé.	60
Figure 2.17 : Valeur de rendement du PMIC une fois intégré au prototype. Mesures réalisées au long d'une journée avec une puissance générée par les cellules allant de 0 à 2 mW.	61
Figure 2.18 : Schéma du système d'analyse de l'environnement lumineux. Association du modèle avec les mesures qu'il requiert et du prototype pour obtenir des résultats de calculs et de mesures pouvant être comparés afin de déterminer la précision du modèle.	62
Figure 2.19 : Environnement de déploiement du prototype et du spectromètre pour l'expérimentation de validation du modèle de calcul. De gauche à droite : Période de très beau temps, ciel bleu, forte intensité lumineuse ; période de passage nuageux, luminosité diffuse ; période d'éclairage mixte naturel/artificiel ; période d'utilisation d'éclairage artificiel (nuit).	63
Figure 2.20 : Système complet de mesure en cours d'utilisation, sans appareil consommateur connecté.	64
Figure 2.21 : Comparaison des résultats de l'expérimentation de validation du modèle de calcul. En bleu : la puissance et l'énergie qui devraient être transmises à la batterie selon les calculs du modèle. En pointillés rouges : les mesures de puissance et d'énergie transmises à la batterie du prototype.	65
Figure 2.22 : Représentation d'un récupérateur d'énergie ayant une surface de récupération d'énergie d'environ 250 cm ² et qui selon les expérimentations réalisées devrait suffire à rendre autonome la tablette d'affichage.	66
Figure 3.1 : Réponse spectrale des capteurs utilisés pour le système d'analyse. (a) Réponse spectrale du TSL2561 de TAOS [102] (b) Réponse spectrale du capteur ISL29125 de RENESAS [103].	73

Figure 3.2 : Schéma du système d'analyse embarquant les capteurs TSL2561 et ISL29125 dont les données sont récupérées par un microcontrôleur ESP32 d'ESPRESSIF, utilisé par la carte HUZZAH32 d'Adafruit. Ces données sont ensuite transférées par wifi sur la base de données hébergée par le serveur.....	74
Figure 3.3 : À gauche, vue de dessous et de dessus du circuit imprimé réalisé par ordinateur. À droite, vue de dessous et de dessus du circuit imprimé une fois fabriqué.	75
Figure 3.4 : Instrument de mesure compacte une fois assemblé.....	76
Figure 3.5 : Interface graphique utilisée pour récolter et sauvegarder les données d'observations.	77
Figure 3.6 : Exemples de 3 pseudospectres mesurés par les capteurs du système d'analyse. Les différences de mesures entre ces trois sources de lumière sont sensibles.	77
Figure 3.7 : Données affichées sur le site web (bastienpoliti.fr) hébergé par le serveur dont la base de données stocke les mesures du système d'analyse.....	78
Figure 3.8 : Exemple d'informations nécessaires à l'entraînement d'un classifieur. À gauche les valeurs d'observations et à droite les informations de classes attribuées à chacune des observations par le superviseur (l'utilisateur).	79
Figure 3.9 : Processus d'entraînement de classifieur à partir du même jeu de données, mais de différentes méthodes de classification. Cela donne des classifieurs avec des frontières entre classes qui peuvent être très différentes.	80
Figure 3.10 : Schéma des différentes étapes du processus utilisé pour obtenir un classifieur performant.	81
Figure 3.11 : Résultats des entraînements des classifieurs à partir du jeu de données brutes. Le taux de classification correcte de ce jeu de données atteint un maximum de 96,8 % pour la configuration A à laquelle est appliqué un classifieur SVM cubique. ..	85
Figure 3.12 : Représentation des 126 observations du jeu de données brutes. (a) Chaque observation est positionnée en fonction de la valeur de Rouge et Infrarouge qu'elle a enregistrée. (b) Résultats de classement du classificateur « Cubic SVM ». Les croix représentent les classes incorrectement attribuées.	86
Figure 3.13 : Surface de décision du classificateur « Cubic SVM ». Les points en surbrillance correspondent aux valeurs d'observations et donc le type de classe à reconnaître.....	87
Figure 3.14 : Surfaces de décision des classifieurs entraînés les plus performants.....	88
Figure 3.15 : Représentation des observations de sources lumineuses et leurs différentes classes, après avoir appliqué les normalisations de la différence.	90
Figure 3.16 : Surface de décision obtenue pour différents classifieurs en appliquant les normalisations de la différence proposées. Les points sombres correspondent aux valeurs des observations disponibles dans les jeux de données.	93
Figure 3.17 : Performances des classifieurs à l'entraînement en utilisant la normalisation des différences par rapport à la valeur de vert.	94
Figure 3.18 : Récapitulatif des classifieurs et des configurations atteignant les 100 % de classification correcte, toutes normalisations confondues.	95

Figure 3.19 : Environnement lumineux contrôlé utilisé pour créer les données de test de généralisation pour les classifieurs ayant passé l'épreuve de l'entraînement.	96
Figure 3.20 : Résultats de généralisation des classifieurs pour les différents types de normalisation appliqués aux données.	98
Figure 3.21 : Résultats de validation d'un classifieur utilisant la méthode « Fine KNN » associée à la configuration de données R.	101
Figure 3.22 : Valeur du ratio de basculement des classifieurs valides. 6 classifieurs ont un ratio proche de la valeur souhaitée de 50 %.	102
Figure 3.23 : Interface graphique permettant d'entraîner des classifieurs de source de lumière à partir des jeux de données constitués par l'interface graphique de la Figure 3.5. Le bouton « Connect MS » permet de connecter le dispositif à faible coût surnommé « MicroSpectro » (MS).	103
Figure 3.24 : Différence entre un système d'analyse de la lumière à faible coût par rapport à un système semblable de référence. Ces différences sont données en fonction des différentes normalisations utilisables ainsi que sans normalisation.	105
Figure 4.1 : Schéma descriptif du processus de reconstruction du spectre à partir des mesures du système à bas coût.	109
Figure 4.2 : Résultats du modèle de calcul à partir du premier test de reconstruction dans un environnement lumineux contrôlé.	111
Figure 4.3 : Valeurs d'intensité lumineuse données par le capteur TSL2561 et normalisées par rapport aux valeurs observées par le spectromètre. Ses valeurs dépendent du type de source lumineuse ainsi que l'intensité à laquelle le capteur est soumis.	112
Figure 4.4 : Résultats du modèle de calcul à partir des données de reconstruction prenant en compte les coefficients de correction de l'intensité lumineuse. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus par le modèle avec des mesures réalisées au spectromètre et ceux obtenus en pratiques avec le prototype.	113
Figure 4.5 : Premiers résultats de l'application de la méthode de reconstruction de spectre à des mesures réalisées en environnement réel.	114
Figure 4.6 : Évolution de l'erreur de mesure de l'intensité lumineuse du système à faible coût en fonction de l'intensité lumineuse de référence du spectromètre. Mesures réalisées durant une journée entière dans un environnement essentiellement éclairé par la lumière naturelle passant au travers d'une fenêtre.	116
Figure 4.7 : Différence de composition entre 4 spectres lumineux de période différente de la journée.	117
Figure 4.8 : Choix des différentes sources de lumière naturelle à ajouter au système de classification pour plus de précision.	118
Figure 4.9 : Description du fonctionnement de la reconstruction de spectres avec l'ajout de la correction de la valeur de l'intensité lumineuse mesurée par le système à faible coût.	119
Figure 4.10 : Résultat de la méthode de reconstruction, après avoir implémenté une correction plus précise des valeurs mesurées par le système à faible coût de l'intensité lumineuse.	120

Figure 4.11 : Comparaison des résultats calculés de récupération d'énergie avec ceux mesurés sur 16 journées d'observations.	122
Figure 4.12 : Exemple de résultats obtenus en utilisant l'interface qui met en œuvre la méthode d'évaluation.....	123
Figure 5.1 : Illustration synthétique des travaux réalisés.....	129
Figure 6.1 : Perspectives envisagées à plus ou moins court terme à la suite des travaux réalisés durant ce projet de thèse.	130

Résumé

Rendre autonomes en énergie les appareils connectés qui nous entourent devient aujourd'hui un enjeu important. Différentes sources d'énergie ambiante peuvent alors servir à les alimenter. Cependant, selon le type d'environnements dans lesquels ils sont installés, les sources d'énergie ambiante présentes peuvent varier. La quantité d'énergie des sources disponibles peut être inégale et inconstante. L'entreprise Bureaux A Partager (BAP), initiatrice de cette thèse, entend appliquer cette approche à des tablettes d'affichage connectées, utilisées dans les espaces communs de ses bureaux, afin de réduire les contraintes et coûts de leur installation et de leur utilisation. Néanmoins, la quantité d'énergie consommée par cette tablette numérique est entre cent et mille fois supérieure à celle des dispositifs généralement rendus autonomes par cette méthode d'alimentation électrique. La rendre autonome est donc un défi de taille qui nécessite de connaître avec précision les sources d'énergie à disposition dans son environnement et la quantité d'énergie qui peut en être récupérée.

Cette thèse CIFRE expose tout d'abord en quoi la lumière semble être l'énergie ambiante la plus favorable à rendre autonome un appareil qui consomme plus de 10 mW de puissance moyenne dans un environnement de bureaux. Le besoin de connaître l'énergie récupérable en pratique dans un environnement précis afin de développer des récupérateurs d'énergie adaptés a mené à développer une méthode de calcul. Elle repose sur des mesures de caractéristiques électrique et optique d'un convertisseur photovoltaïque et du spectre lumineux ambiant. Ces performances de calculs sont validées en comparant ses calculs aux mesures de récupération d'énergie d'un prototype de récupérateur. Pour s'affranchir des contraintes liées aux instruments de mesure coûteux et complexes nécessaires à l'acquisition du spectre lumineux, un système d'analyse à faible coût et à faible résolution spectrale est développé. Grâce à l'utilisation de méthodes de classifications des sources lumineuses et de reconstruction spectrale, ce système est capable de réaliser des évaluations de l'énergie récupérable équivalentes en précision à celles obtenues avec les instruments à haute résolution. Les résultats d'observations obtenus ont permis d'établir que pour rendre autonome le dispositif d'affichage de BAP, un récupérateur d'énergie d'une surface d'environ 250 cm² de cellules en arséniure de gallium serait adapté.

Summary

Energy autonomy for the connected devices around us is becoming an important issue today. Various sources of ambient energy can be used to supply them with power. However, depending on the type of environment in which they are set up, the ambient energy sources available may vary. Besides, the amount of energy from the available sources can be uneven and inconsistent. The company Bureaux A Partager (BAP), the initiator of this thesis, intends to apply this approach to smart tablet displays used for the shared areas of its offices to reduce the constraints and costs of their installation and use. Yet, the amount of energy consumed by this digital tablet is between one hundred and one thousand times greater than that of devices generally made autonomous by this method of power supply. Therefore, making the tablet autonomous is a major challenge that requires precise knowledge of the energy sources available in its environment and the amount of energy harvestable from them.

This industrial thesis first explains how the light seems to be the ambient energy most likely to make a device that consumes on average more than 10 mW of power autonomous in an office environment. The necessity to know the energy available in practice in a specific environment to develop energy harvesting systems adapted to it led to developing a calculation method. It is based on measurements of a photovoltaic converter's electrical and optical characteristics and the ambient light spectrum. The calculations are validated by comparing them with the energy harvesting measurements of a prototype energy harvesting systems. A low-cost analysis system with a low spectral resolution is developed to overcome the constraints associated with the costly and complex instruments required to acquire the light spectrum. Using light source classification and spectral reconstruction methods, the system can perform recoverable energy evaluations equivalent in accuracy to those obtained with high-resolution instruments. In conclusion, the results of the observations obtained made it possible to establish that, to make the BAP display tablets autonomous, an energy harvesting device with a surface area of approximately 250 cm² of gallium arsenide cells would be suitable.