



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Concevoir un chantier respectueux de l'environnement par le choix des matériaux

Etude de la piézoélectricité



2016-2017

Directeur de recherche

Gralepois Mathilde

Junquet Clément

Comment concevoir un chantier respectueux de l'environnement (choix des matériaux) ?

Etude de la piézoélectricité

Directeur de recherche :

Clément Junquet

Mathilde Gralepois

2016-2017

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche et projet de fin d'études

EN GENIE DE L'AMENAGEMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Madame Gralepois, ma tutrice lors de ce projet de fin d'étude, qui m'a aidé à organiser mes idées et à élaborer les plans de ce rapport.

Je remercie également mes deux tuteurs de contrat de professionnalisation, Frédéric Tibaudou, conducteur de travaux, et Cyrille Poullain, pour les données et conseils qu'ils m'ont apportés.

Sommaire

Avertissement	4
Formation par la recherche et projet de fin d'études	5
Remerciements	6
Sommaire	7
Table des modélisations.....	9
Table des graphiques.....	9
Table des photographies	9
Table des figures.....	9
Table des cartographies	10
Table des tableaux.....	10
Introduction.....	11
1. L'important besoin électrique des infrastructures routières.....	17
1.1. L'éclairage public, le premier besoin électrique des infrastructures routières	17
1.1.1. L'éclairage public, nécessaire et imposant	17
1.1.2. L'éclairage public, fort consommateur d'électricité	19
1.2.3. Un système mathématique pour une consommation estimée de l'éclairage public.....	20
1.2. Signalisation routière lumineuse, une partie non négligeable du besoin électrique des infrastructures routières.....	23
1.2.1. L'omniprésence de la signalisation routière lumineuse	23
1.2.2. L'importante consommation électrique de la signalisation routière lumineuse.....	26
1.2.3. Un système mathématique pour connaître la consommation électrique de la signalisation routière lumineuse	27
1.3. Un système mathématique pour connaître le besoin électrique des infrastructures routières	29
2. La faible production électrique du flux de véhicules par la piézoélectricité	31
2.1. La piézoélectricité, vraiment si productive ?.....	31
2.1.1. La piézoélectricité, énergie renouvelable	31
2.1.2. La faible production piézoélectrique	32
2.2. Le flux de véhicules, fournisseur de piézoélectricité.....	34

2.3. Un système mathématique, pour voir la production piézoélectrique du flux de véhicules.....	37
3. La production piézoélectrique par flux de véhicules, mauvaise idée pour couvrir le besoin en électricité des infrastructures routières	39
3.1. Un système mathématique pour calculer la réponse de la piézoélectricité face à des besoins spécifiques.....	39
3.2. La création d'une application pour analyser l'impossibilité de couvrir les besoins électriques par la piézoélectricité, mais aussi comme outil de dimensionnement pour le conducteur de travaux	40
3.3. Le décalage horaire entre production et besoins, première incompatibilité	41
3.4. Le faible pourcentage couvert par la piézoélectricité	42
Conclusion	44
Bibliographie	45
Ouvrage :	45
Manuel et guide technique	45
Webographie et Articles en ligne :	45

Table des modélisations

Modélisation 1 : Besoin électrique de l'éclairage public	22
Modélisation 2 : Besoin des panneaux de signalisations.....	28
Modélisation 3 : Besoin des feux de signalisations.....	28
Modélisation 4 : Besoin électrique des infrastructures routières	29
Modélisation 5 : Production piézoélectrique d'un véhicule	33
Modélisation 6 : Production piézoélectrique en fonction du flux de véhicule.....	38
Modélisation 7 : Bilan entre production et besoin électrique	39
Modélisation 8 : Application	41

L'ensemble des modélisations est réalisée par Clément JUNQUET.

Table des graphiques

Graphique 1 : Horaires de lever et coucher de soleil annuel à Orléans	18
Graphique 2 : Distribution horaire des mobilités automobiles sur une voirie pendant une journée moyenne à Poitiers.	35
Graphique 3 : Distribution horaire des déplacements en Belgique Source : Hubert	35
Graphique 4 : Flux de véhicules sur la RD97	36
Graphique 5 : Nombre de secondes séparant chaque impulsion piézoélectrique.....	37
Graphique 6 : Horaire du lever et coucher de soleil avec les premiers flux important.....	42
Graphique 7 : Flux ayant un besoin d'électricité	42

Table des photographies

Photographie 1 : Dalle photovoltaïque Wattway	13
Photographie 2 : Travaux sur la RD97	15
Photographie 3 : Panneaux lumineux	25

Table des figures

Figure 1 : Innovation Lumi+.....	12
Figure 2 : Représentations du Lux et du Lumen.....	19
Figure 3 : Exemple de feux de signalisation	24
Figure 4 : Exemple de feux de signalisation	24
Figure 5 : Principe piézoélectrique.....	31

Table des cartographies

Cartographie 1 : Tracé de la RD97.....	16
--	----

Table des tableaux

Tableau 1 : Lux nécessaires en fonction du type de chemin	20
Tableau 2 : Valeur de chacun des types de voirie	21
Tableau 3 : Puissance en Watt de chacun des types de feux de signalisation	26
Tableau 4 : Différents types des feux de signalisation.....	27
Tableau 5 : Puissance de chacun des types de panneaux de signalisation.....	27

L'ensemble des tableaux est réalisée par Clément JUNQUET.

Introduction

L'environnement est un enjeu de plus en plus important et pris en compte par les entreprises de travaux publics. En effet, les impacts sur l'environnement d'un chantier de travaux publics sont nombreux. La consommation d'énergie et l'utilisation de matériaux naturels en grandes quantités sont les principaux impacts. Cependant les chantiers de travaux publics ont une production de déchets importante. Enfin, ils agissent sur l'eau et les sols, émettent de la poussière,... Les entreprises de travaux publics sont conscientes de leurs responsabilités, c'est pour cela qu'elles développent des procédés innovants pour préserver l'environnement.

Parmi les leaders du marché (Colas, Guintoli, Eiffage), Eurovia réalise de très gros chiffres d'affaires (8,6 milliards d'euros en 2013) et se situe en pole position du marché. En 2015, afin de marquer un fort engagement environnemental, Eurovia a mis au point un label "Excellence Environnement". Sur ses chantiers, Eurovia s'engage à mettre en place des actions pour de meilleures pratiques (mise en place de bennes pour le recyclage des déchets, réutilisation de matériaux comme de l'enrobé, choix de matériaux « vert »).

Parmi les principaux acteurs des chantiers de travaux publics (Chef de chantier, Maître d'œuvre, Maître d'ouvrage, Conducteur de travaux), le conducteur de travaux intervient et répond aux demandes de ses clients en établissant des propositions techniques nécessaires à toutes les étapes du chantier. Lors de la conception du chantier il établit, en relation permanente avec le client, les plans et choisit les matériaux. Lors de la phase de réalisation, il est le garant de la bonne conduite et de la sécurité du chantier. Enfin, il est présent lors de la remise du chantier. En tant que premier intermédiaire avec le maître d'œuvre du projet, le conducteur de travaux peut jouer un rôle important dans le respect de l'environnement dans la gestion du chantier ou encore dans le choix des matériaux.

Le conducteur de travaux peut alors, par le choix des matériaux, répondre aux contraintes écologiques et proposer des solutions respectueuses de l'environnement. Cette tâche est particulièrement difficile à mettre en œuvre. En effet, le marché des travaux publics est en baisse. D'après la Fédération Nationale des Travaux Publics, la profession a réalisé en 2014, en France, un chiffre d'affaires de 42,5 milliards d'euros, en retrait de 5 % par rapport à 2013, et s'attend à une augmentation de cette baisse, en 2015, de 8% (Rapport d'activité 2015, FNTP).

Ce recul de l'activité s'explique par le fait que le secteur des travaux publics est soutenu à 75% par les commandes des collectivités locales qui sont de moins en moins nombreuses dans le contexte de baisse annoncée de la dotation de l'Etat de 11 milliards d'euros sur trois ans. (Projet de la loi des finances, 2015).

Les entreprises sont donc contraintes à réduire leurs prix pour répondre à la demande. Or les matériaux présentant des caractéristiques fortement respectueuses de l'environnement sont, en moyenne, plus chers que les matériaux dits « basiques ». Les objectifs pour le conducteur de travaux sont donc multiples, il faut à la fois proposer des

projets ayant des coûts permettant d'obtenir le chantier mais aussi utiliser des matériaux labélisés « Excellence Environnement ». Sous l'essor flagrant des « bonnes pratiques » environnementale, que recouvre vraiment le respect de l'environnement dans la conduite de travaux ? Pour cela, nous prendrons un cas d'étude spécifique (voire « vert ») chez Eurovia.

Depuis de nombreuses années, Eurovia consacre des moyens importants à la recherche et au développement. L'entreprise possède plus 160 brevets dans les domaines routiers et ferroviaires. Dans l'optique du respect de l'environnement, Eurovia doit créer de nouveaux matériaux. L'une des dernières innovations, Lumi +, est un enrobé qui permet de réduire la consommation électrique liée à l'éclairage public de 30 à 40%. Lumi+ est un enrobé fabriqué à partir de granulats clairs qui, une fois décapés, permettent d'obtenir un revêtement avec une luminance plus élevée que celle des enrobés habituels.

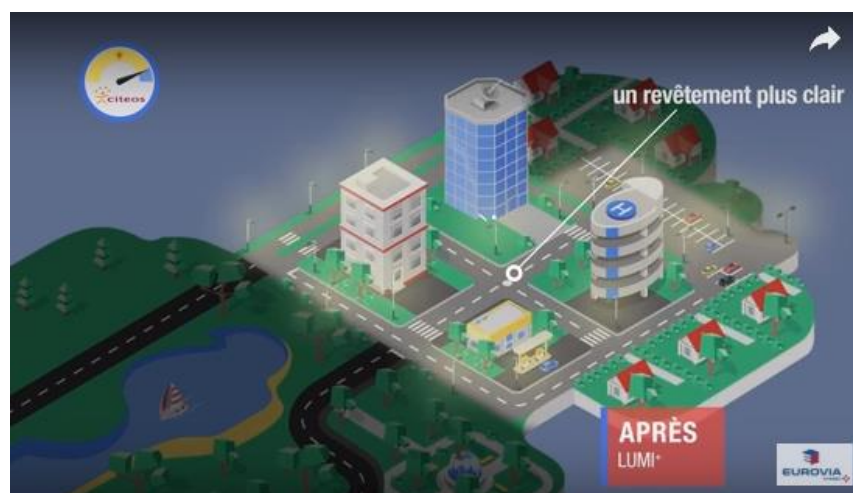


Figure 1 : Innovation Lumi+

Source : eurovia.com

Cette innovation est bénéfique pour plusieurs secteurs. Premièrement, Lumi+ permet de réduire les consommations énergétiques des communes. Selon l'ADEME, L'Agence de l'Environnement Et de la Maîtrise de l'Energie, l'éclairage public représente 16 % des consommations des communes toutes énergies confondues. (Éclairage public : un gisement d'économies d'énergie, 2014). Ce qui en fait une part importante de leurs budgets, environ 17%. Ces réductions de consommations énergétiques permettent d'une part des économies non négligeables pour les communes, et d'autre part de préserver les ressources énergétiques.

Deuxièmement, l'Etat français souhaite prendre des mesures contre la pollution lumineuse. « Les conséquences de l'excès d'éclairage artificiel ne se résument pas à la privation de l'observation du ciel étoilé. Elles sont aussi une source de perturbations pour les écosystèmes (modification du système proie-prédateur, perturbation des cycles de reproduction, perturbation des migrations...) et la santé humaine. De plus ce phénomène représente un gaspillage énergétique considérable ». (Ministère de l'Écologie, du

Développement durable et de l'Énergie, Novembre 2014¹). En permettant de diminuer de près 40% l'intensité des éclairages publics, Lumi+ participe cette réduction des pollutions lumineuses.

Lumi+ permet donc de réduire les consommations en électricité et les pollutions lumineuses. Pour aller plus loin dans ce sens, il faudrait que le conducteur de travaux puisse proposer une route qui combinerait les différents avantages de Lumi+ mais qui produirait l'électricité nécessaire pour couvrir les besoins de l'éclairage public et de la signalisation routière. On obtiendrait donc l'indépendance électrique, par les énergies renouvelables, des infrastructures routières, et mon objet de recherche concerne cet objectif. Pour cela, l'enrobé Lumi+ peut être accompagné d'un système générateur d'énergie.

Aujourd'hui, de nombreuses recherches portent sur les routes, totalement ou partiellement, solaires. En effet, les voiries couvrent de grandes superficies des territoires. Elles sont fortement exposées au rayonnement solaire. Même lorsque les voiries sont très fréquentées, elles sont au contact du rayonnement solaire. Pour Jean-Luc Gautier, directeur du Centre d'expertise du Campus Scientifique et Technique de Colas, « la route passe 90 % de son temps à regarder le ciel, et, quand le soleil brille, elle est exposée à son rayonnement. C'est une surface idéale pour développer des applications énergétiques ».

Des recherches sont alors menées par Colas, leader mondial des travaux publics et en concurrence avec Eurovia sur le territoire Français, en collaboration avec l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES). Les recherches aboutissent en 2015 à une innovation. Wattway qui est une route constituée de plusieurs dalles de panneaux photovoltaïques. Chaque dalle est composée de cellules de silicium polycristallin. Extrêmement fragiles, les cellules photovoltaïques sont enrobées de résines et de polymères, qui sont assez translucides pour laisser passer la lumière du soleil et assez résistants pour supporter le poids des véhicules.



Photographie 1 : Dalle photovoltaïque Wattway

Source : Sanovia Energie

¹ Rapport à retrouver sur le site du ministère de Développement durable : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/14_DGPR_Nuisances_lumineuses_4p_def_web.pdf

Une faible superficie de dalles Wattway, environ 20 m² seulement, avec 1 000 heures d'ensoleillement annuel (en France, les départements qui reçoivent le moins d'ensoleillement sont ceux de Bretagne avec tout de même 1400 heures annuelles²) pourrait alimenter un foyer français moyen (ADEME/CEREN, 2014) et 100 m² de Wattway fournissent l'énergie nécessaire pour parcourir 100 000 km par an avec un véhicule électrique (INES, 2014). De plus, INES affirme « qu'il suffirait que 2.5% des routes soient couvertes de panneaux Wattway pour produire l'équivalent de 10% de la production totale française ».

Cependant, l'innovation Wattway ne peut pas produire de l'énergie en continu ; la nuit les panneaux photovoltaïques ne produisent pas d'électricité, alors que le besoin en électricité des infrastructures routières est alors le plus fort.

Pour pouvoir obtenir l'indépendance électrique des infrastructures routières grâce aux routes solaires, il faut alors mettre en place un système de stockage. Or, il serait bénéfique de ne pas passer par un quelconque stockage.

Si les routes, par leurs superficies et leurs expositions au soleil, permettent de produire une grande quantité d'énergie, elles supportent aussi un flux important de véhicules, qui, par leur vitesse, leur nombre et la chaleur produite, représentent un fort potentiel de production d'énergie. (Hautière et al., 2014)

De plus en plus d'études ont pour objet la production piézoélectrique. Cependant aucune ne donne, chiffres à l'appui, les conditions nécessaires pour produire suffisamment d'électricité afin de couvrir l'ensemble des besoins électriques d'une infrastructure routière. Et, si les chiffres nous montrent qu'il est possible de produire autant d'électricité que l'on en consomme, les flux d'automobilistes se répartissent suivant 3 pics, l'un en début, l'autre en fin de journée, et le dernier un peu plus faible en milieu de journée, lors des trajets domicile - travail. (Cirillo et al., 2004). Ce flux de voitures est quasiment nul pendant la nuit, alors que le besoin d'électricité est, durant cette période, le plus fort. Ce décalage dans le temps entre la production et le besoin risque, ici aussi, de réduire l'indépendance électrique des infrastructures routières, sans passer par un stockage.

La problématique suivante se pose alors : Bien que le flux automobile permette de produire de l'électricité, la piézoélectricité, accompagnée de l'innovation Lumi+, peut-elle produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins des voiries, sans stockage de l'énergie ?

Selon la Dr Lucy Edery-Azulay, directrice du projet pour la start-up israélienne Innawattech, une route piézoélectrique pourrait produire jusqu'à 500 kilowatt-heures, le procédé nécessite cependant « un trafic minimum de 600 véhicules par heure ».

² Données récoltées par le site internet Actualitix : <http://www.actualitix.com/nombre-d-heures-d-ensoleillement-par-depa.html>

Nous verrons donc, dans une première partie, que le besoin électrique des infrastructures est très important. Nous définirons dans un premier temps celui-ci, puis nous le chiffrerons. Nous démontrerons en deuxième partie, que le flux de véhicules ne permet qu'une faible production piézoélectrique. Et enfin, nous expliquerons pourquoi la piézoélectricité n'est pas une bonne solution pour couvrir les besoins électriques des infrastructures routières, comme peut l'annoncer le bureau d'étude Innowatch, par la voix de la Dr Lucy Edery-Azulay.

Tout au long de ce rapport, nous définirons, analyserons et créerons un modèle mathématique de chaque type de besoins qu'il est nécessaire de couvrir. Puis nous procéderons de la même manière pour la partie production piézoélectrique. Enfin, nous prendrons comme exemple, à chaque fois que cela sera nécessaire, la RD97 à Orléans.

Les systèmes mathématiques seront réalisés sous Toaster. Toaster est « un environnement intégré composé de modules permettant de concevoir des modèles complexes (Toaster systems). Toaster représente un environnement complet et efficace dédié à la modélisation numérique dans le domaine de l'ingénierie » (Copyright Mindjid Maïzia, Polytech Tours, 2014-2018). Le choix de Toaster s'explique car c'est un logiciel qui permet de créer des modèles mathématiques faciles de compréhension et d'utilisation. De plus, il est possible de passer d'un modèle mathématique à une application intuitive.

Nous prendrons l'exemple de la RD97, car c'est l'une des voiries les plus empruntées³ sur l'agglomération d'Orléans. De plus, une réfection totale de cette voirie a été effectuée en début d'année par Eurovia, (photographie 2). Comme je réalise un contrat de professionnalisation à Eurovia la collecte des données sera alors facilitée. Cette voirie, par son fort flux de véhicules, va donc nous permettre de voir si la piézoélectricité couvre le besoin des infrastructures routières. Ce qui conclura directement sur les voiries à faible flux.



Photographie 2 : Travaux sur la RD97

Source : La République du Centre

La RD97 relie notamment l'A19 à la tangentielle. Son tracé se situe en cartographie 1.

³ Données de Geoloiwet récoltées en 2014 sur le département du Loiret (45)



Cartographie 1 : Tracé de la RD97

Source : Google Map

Les équipes d'Eurovia, lors des travaux de début d'année ont travaillé sur le tronçon le plus emprunté qui se situe à proximité de la tangentielle. L'agglomération d'Orléans n'a pas opté pour l'innovation Lumi+, par choix budgétaire. Nous ferons dans notre exemple comme si l'innovation avait été mise en place, afin de réduire encore les besoins électriques.

1. L'important besoin électrique des infrastructures routières

Pour répondre à notre problématique, et savoir si la piézoélectricité peut produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins des voiries, il est nécessaire de définir ces derniers. En effet, la norme NF C 17-200, relative aux règles d'installations d'éclairage public, les classe suivant deux types.

Le premier fait référence aux installations dont le maintien en fonctionnement est nécessaire pour la sécurité des usagers et riverains, comme l'éclairage, les feux de signalisations ou encore bornes et panneaux lumineux. Le second mentionne les installations dont le non-fonctionnement ne met pas en cause la sécurité des usagers et riverains. Il s'agit des abris bus, des publicités lumineuses, des plans, ou bien des horodateurs,...

Nous allons nous intéresser, dans notre cas, uniquement aux installations dont le maintien en fonctionnement est nécessaire pour la sécurité des usagers et riverains. En effet, nous pouvons constater que le second type d'installations d'éclairage public n'interagit pas clairement avec les voiries, au contraire des lampadaires ou encore des feux de signalisation.

1.1. L'éclairage public, le premier besoin électrique des infrastructures routières

Dans cette première partie, nous allons voir que l'éclairage public est l'un des principaux besoins des infrastructures routières. Pour cela, nous verrons qu'il est nécessaire à la sécurité des déplacements mais qu'il consomme d'importantes quantités d'électricité. Enfin, nous établirons un modèle mathématique pour définir les besoins de l'éclairage public en fonction des caractéristiques de la voirie.

1.1.1. L'éclairage public, nécessaire et imposant

L'éclairage public est, par définition générale, l'ensemble des moyens mis en place, le plus souvent en bordure de voiries, nécessaire à la sécurité de la circulation des véhicules, ou à la mise en valeur d'espaces urbains.

L'éclairage public est un « dispositif permettant d'assurer une tâche visuelle nocturne en sécurité. A partir d'un besoin défini (déplacement, sécurité,...), les choix en matière d'éclairage doivent être adaptés aux usagers, aux riverains et à l'environnement (profil nocturne, développement durable) ». (Couillet, 2014)

Selon Jean-Louis Bal, directeur des énergies renouvelables à l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), en France, 9 millions de lampes seraient nécessaires pour éclairer les voiries, ce qui représente près de 1.260 MW, soit l'équivalent d'un réacteur nucléaire. La facture énergétique est estimée entre 400 à 500

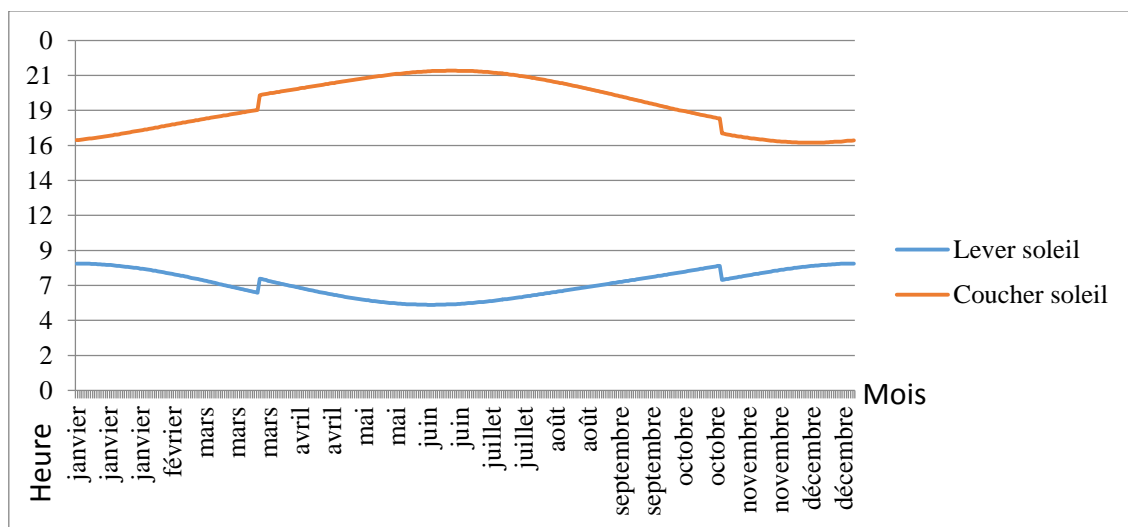
millions d'euros par an. L'éclairage public représente pour les communes, 23 % de la facture globale d'énergie et 38 % de la facture d'électricité, explique Frédéric Delord, directeur de Développement chez ETDE, filiale de Bouygues, spécialiste en France dans le domaine de la gestion globale de l'éclairage public.

Pour Roger Couillet, (Couillet, 2014), « Sous l'impulsion du Grenelle II, l'éclairage public est en pleine mutation. La nécessité d'assurer la sécurité des installations tout en utilisant des équipements performants a entraîné une mutation technologique (équipements, sources lumineuses) et économique (conception en termes de coûts global) dans un cadre politique très exigeant quant aux enjeux environnementaux et énergétiques ».

La voirie comprend l'ensemble des voies de circulation et leurs dépendances situées sur le domaine public. Les voies de circulation sont destinées à différents types de trafic. Le plus représenté est le trafic motorisé. On retrouve aussi le trafic piéton, notamment en centre-ville. On peut également citer le trafic cycliste ou des véhicules spéciaux (poids lourds, véhicule lents,...)

Enfin, l'éclairage public nécessite de l'électricité seulement au moment où les lampes doivent être allumées. Les lampadaires sont dans la plupart des cas, programmés pour s'allumer au début du coucher de soleil et s'éteindre à la fin du lever du soleil.

Dans notre exemple, le cas de le RD97 à Orléans, voici le graphique du lever et coucher de soleil à Orléans :



Graphique 1 : Horaires de lever et coucher de soleil annuel à Orléans

Réalisation : Clément Junquet

Il y a donc un besoin électrique pour l'éclairage public sous la courbe du lever de soleil (bleue) et au-dessus de la courbe du coucher de soleil (orange). Au 21/12, le jour où le soleil se lève le plus tard et où il se couche le plus tôt, le besoin est compris entre 17h02 et 8h39 pour une durée totale de 15h37. A l'inverse, le besoin de l'éclairage public est le plus faible le 21/06, il est compris entre 21h53 et 5h53, pour une durée totale de 8h.

En donnant de grandes définitions de l'éclairage public, nous avons vu que celui-ci est nécessaire pour une bonne sécurité des usagers, et qu'il est une part importante des budgets et des consommations des collectivités.

1.1.2. L'éclairage public, fort consommateur d'électricité

Pour étudier la consommation électrique de l'éclairage public, il faut calculer, dans cette partie, les besoins en électricité de l'éclairage public. Ce besoin d'électricité va dépendre des voiries. En effet, chaque voirie a des besoins d'éclairement différents en fonction de leurs caractéristiques (largeur, flux automobile, nombres de voies, danger, zone piétonne,..)

L'unité de mesure de l'éclairement lumineux est le lux (lx). Il caractérise le flux lumineux reçu par unité de surface. Un lux, soit une unité d'éclairement, correspond à un Lumen par m².

Sa formule est donc : $1 \text{ Lux} = \frac{1 \text{ Lm}}{\text{m}^2}$

Le lumen (Lm) est l'unité dérivée du Système International du flux lumineux. Le schéma ci-dessous (figure 1), montre le passage du Lux au Lumen.

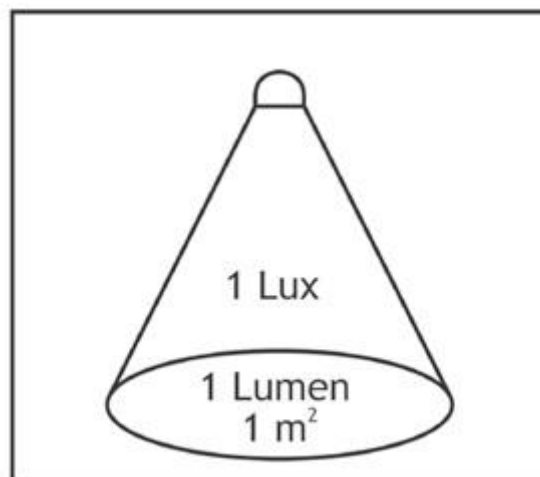


Figure 2 : Représentations du Lux et du Lumen

Source : Groothandelxl

Plus la voirie est importante, plus elle exige un fort éclairement lumineux. On peut distinguer 5 types de voiries, du chemin à l'autoroute. Le tableau ci-dessous nous donne le flux lumineux par unité de surface nécessaire pour assurer la sécurité aux flux de véhicules sur les différentes voiries.

Type de voie	Lux (lx)
Chemin	10
Rue	20
Route	30
2*2 voies	40
Autoroute	50

Tableau 1 : Lux nécessaires en fonction du type de chemin

Pour simplifier la démarche, nous noterons que 1W correspond à une valeur proche de 10lm pour des éclairages publics. En effet, chaque ampoule a une valeur de conversion entre lumens et watt différente, mais si nous prenons une moyenne, (réalisée sur des ampoules de la marque Ooreka) nous observons effectivement qu'environ $1W=10lm$.

Nous souhaitons déterminer les besoins en électricité de l'éclairage public, donc la puissance nécessaire pour faire fonctionner les lampadaires. Pour cela, il faut connaître la surface totale de la voirie à éclairer et le type de voie correspondant qui donne directement le nombre de Lux nécessaire. Comme le nombre de Lux et de Lumens sont dépendants l'un de l'autre, on en déduit le nombre de Watts nécessaire.

En effet, prenons l'exemple d'une voirie, ayant une surface de $100m^2$, qui a besoin de 10 Lux pour assurer une bonne sécurité. D'après l'équation cela correspond à $10\text{ lm}/m^2$, donc à $1W/m^2$. Pour éclairer suffisamment la voirie il est donc nécessaire d'avoir une puissance continue de 100W.

Ces résultats nous montrent qu'en fonction des caractéristiques de la voirie, et pour avoir une luminosité suffisamment importante, l'éclairage public doit bénéficier d'une grande puissance électrique.

1.2.3. Un système mathématique pour une consommation estimée de l'éclairage public

Pour mesurer les résultats précédents et étendre les formules de calculs à toutes les caractéristiques de voirie possible, un modèle mathématique est retenu afin de d'obtenir rapidement le besoin de l'éclairage public.

D'après l'équation expliquée dans la partie ci-dessus, il est possible de créer un système mathématique pour calculer la puissance électrique nécessaire à l'éclairage public. Le système est réalisé sous Toaster, comme expliqué précédemment (partie introduction).

La variable « type de voirie », qui est utilisée dans le modèle mathématique, est comprise entre 1 et 5, comme le montre le tableau 2.

Valeur :	Type	Lux (lx)
1	Chemin	10
2	Rue	20
3	Route	30
4	2*2 voies	40
5	Autoroute	50

Tableau 2 : Valeur de chacun des types de voirie

Une autre variable peut être déterminée : la puissance d'un lampadaire en fonction de l'ampoule installée. Celle-ci nous donne alors le nombre de lampadaires à installer pour obtenir le nombre de lux suffisant sur la voirie.

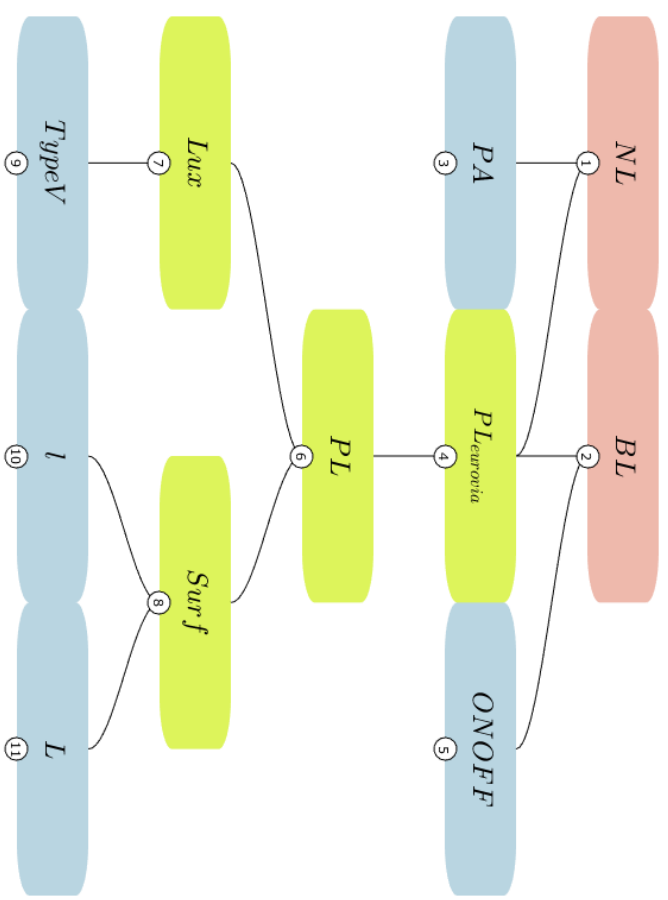
Ainsi, cette dernière variable aide les conducteurs de travaux à sélectionner la source lumineuse permettant d'avoir le moins de lampadaires possible, et ainsi faire des économies, tout en ayant suffisamment d'éclairage sur la voirie.

De nombreux guides permettent de choisir des lampes adaptées à ce que l'on souhaite éclairer. L'ANPCN (Association Nationale pour la Protection du Ciel Nocturne) a créé un guide de recommandations pour un éclairage visant à assurer la sécurité, le confort visuel, des économies et la protection de l'environnement⁴. Les puissances de ces sources lumineuses vont de 20W à 150W.

Ainsi, le système complet (modélisation 1) permet de montrer le besoin électrique de l'éclairage public en fonction des caractéristiques de la voirie et d'obtenir le nombre de lampadaires à installer.

⁴ Ce petit guide illustratif est disponible :

<http://www.valdeloire.org/uploadfiles/publications/1166/recommandations2.pdf>



1	NL : Nombre lampadaire en unité $NL = PL_{eurovia} / PA$
2	BL : Beson en électricité des lampadaires en Wh $BL = PL_{eurovia} \cdot ONOFF;$
3	PA : Puissance ampoule en W $20 \leq PA \leq 150$
4	PL_eurovia : Puissance lampadaire avec luminaire en W $PL_{eurovia} = PL \cdot 0.4;$
5	ONOFF : ON/OFF en unité $0 \leq ONOFF \leq 1$
6	PL : Puissance lampadaire en W <i>Commentaire</i>
7	Lux : Nombre de lux en lx $Lux = TypeV \cdot 10$
8	Surf : Surface voirie en m² $Surf = l \cdot L$
9	TypeV : Type de voirie en unité $1 \leq TypeV \leq 5$
10	l : largeur en m $3 \leq l \leq 10$
11	L : longueur en m $100 \leq L \leq 5000$

Lampadaire
Définition de la fonction Nouveau



Modélisation 1 : Besoin électrique de l'éclairage public

Dans notre cas, prenons un tronçon de la RD97 qui mesure 500m de long et 5m de large. La RD97 est une route, elle est donc définie comme étant une voirie de type 3. Les ampoules installées sont des LEDs avec une puissance de 50W. Le besoin de l'éclairage public est de $7.6 \cdot 10^6 \text{Wh}$, et le nombre de lampadaires à installer pour obtenir une luminosité suffisante est de 60. Ce qui correspond à 1 lampadaire tous les 8m. Pour comparaison, Eurovia a installé 1 lampadaire tous les 10m. On retrouve donc des mesures proches de la réalité.

Ce modèle mathématique montre qu'il est possible de calculer et de donner rapidement le besoin de l'éclairage public ainsi que le nombre de lampadaire à installer. Cette rapidité de calcul permet de d'obtenir des ordres de grandeurs instantanément aux concepteurs de projets routiers.

1.2. Signalisation routière lumineuse, une partie non négligeable du besoin électrique des infrastructures routières

Nous avons étudié dans la précédente partie le premier point de la norme NF C 17-200 faisant référence aux installations dont le maintien en fonctionnement est nécessaire pour la sécurité des usagers et riverains. Pour continuer de répondre à notre problématique, nous allons maintenant étudier le deuxième point de cette norme : le besoin de la signalisation routière en électricité.

1.2.1. L'omniprésence de la signalisation routière lumineuse

Dans cette première partie, nous verrons que la signalisation routière lumineuse est présente sous de multiples formes tout au long des voiries. Il est donc important de la définir pour pouvoir calculer son besoin par la suite.

On peut classer la signalisation routière lumineuse suivant 2 catégories. La première concerne, les feux de circulation et, la seconde les panneaux de signalisation (dangers, cédez le passage clignotant, passage clouté ...).

Un feu de circulation routière est un dispositif permettant la régulation du trafic routier entre les usagers de la route, les véhicules et les piétons. L'article 109-3 de l'instruction interministérielle sur la signalisation routière⁵ décrit les différents types de signaux lumineux d'intersection, que l'on va retrouver le plus régulièrement sur les routes. Il existe tout d'abord les feux de signal tricolores composés de trois feux circulaires (vert, jaune et rouge). Ce premier type de feux est le plus répandu. Le second feu le plus fréquent est le feu de signal piéton, constitué de deux feux vert et rouge (figure 2).

⁵ ARRÊTÉ DU 21 JUIN 1991 relatif à l'approbation de modifications de l'instruction interministérielle sur la signalisation routière (Journal officiel du 1er août 1991)



Figure 3 : Exemple de feux de signalisation

Source : Afe éclairage

Il existe ensuite de nombreux autres feux, qui sont mis en place pour des dangers ou autorisations spécifiques, comme les feux de signaux tricolores modaux (pour bus ou vélos), les feux de signaux tricolores directionnels (pour les directions obligatoires).

Toutefois, pour l'ensemble des feux que nous pouvons retrouver, on compte de une à quatre signalisations lumineuses différentes. De plus, la même signalisation peut être répétée plusieurs fois pour assurer la visibilité de celle-ci. Comme sur l'exemple ci-dessous (figure 3), la structure de droite comporte trois feux tricolores différents. Une même structure peut posséder de un à quatre feux.

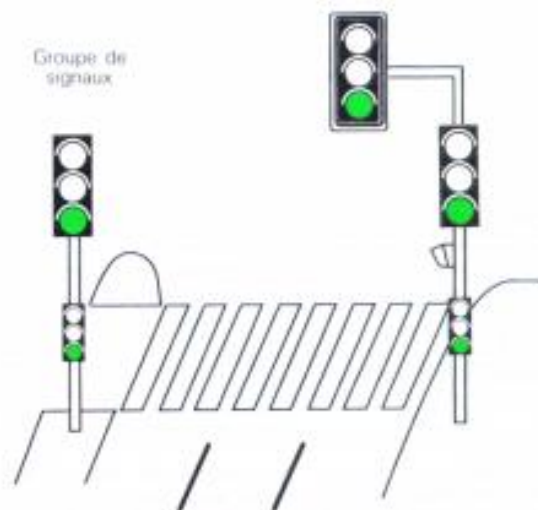


Figure 4 : Exemple de feux de signalisation

Source : tousenroute.com

Les panneaux de signalisation sont eux plus difficiles à définir tant il en existe de types différents. Généralement, ils sont utilisés pour une meilleure sécurité des usagers avec les panneaux de dangers, de cédez le passage clignotant, de passage clouté. Ils peuvent aussi, dans certains cas, apporter des informations aux usagers



Photographie 3 : Panneaux lumineux

Source : trafic.fr

Les panneaux de signalisation lumineux peuvent être allumés tout au long de la journée ou alors uniquement la nuit, tout dépend de leur utilité et de leur hiérarchie dans la signalisation routière. Ils sont généralement composés de petites LEDs (photographie 3).

Nous avons donc vu que la signalisation routière lumineuse pouvait être classée en deux parties, avec les feux de signalisations et les panneaux lumineux. Le feu de signalisation peut être défini relativement facilement, en fonction de sa taille et de son nombre de lentilles. Alors, que le panneau lumineux est lui plus difficile à définir tant il existe de sortes de panneaux.

1.2.2. L'importante consommation électrique de la signalisation routière lumineuse

Pour définir plus précisément les signalisations lumineuses, nous allons dans cette partie donner les puissances nécessaires au fonctionnement de celle-ci.

Contrairement à l'éclairage public qui ne fonctionne qu'à une certaine partie de la journée (Partie 1.1.1.), les feux tricolores ne doivent jamais s'arrêter pour assurer une bonne sécurité.

La consommation électrique de la signalisation routière lumineuse dépend des différents types de feux de signalisation. On retiendra 4 types de feux de signalisation. Les feux tricolores eux-même répartis en trois types en fonction de leurs diamètres, et les feux piétons (généralement de même tailles). Le tableau ci-dessous référence la puissance nécessaire à chacun des types de feux de signalisation. Les puissances ont été recueillies par la marque KM europ (<http://www.km-europ.com>)

Type	Puissance en Watt
Feux tricolores (diamètre de lentille : 100mm)	55
Feux tricolores (diamètre de lentille : 200mm)	60
Feux tricolores (diamètre de lentille : 300mm)	65
Feux piétons	50

Tableau 3 : Puissance en Watt de chacun des types de feux de signalisation

Enfin, le besoin électrique des panneaux de signalisation lumineux est, comme leurs définitions, difficile à borner. En effet, cela dépend de leur type, leur taille, leur éclairement. Cependant, ils sont composés de petites LEDs demandant une faible puissance, allant de 20 Watts pour les petits panneaux à 40 Watts pour les panneaux plus importants (que l'on retrouve sur les autoroutes).

Ces différentes puissances nous montrent que les signalisations routières lumineuses consomment moins que l'éclairage public (partie 1.2.2.), mais celle-ci fonctionnent sans interruption.

1.2.3. Un système mathématique pour connaître la consommation électrique de la signalisation routière lumineuse

Pour associer les puissances données précédemment, aux voiries, il est possible de créer un modèle mathématique afin d'obtenir la puissance nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des signalisations lumineuses.

Pour déterminer le besoin électrique des feux tricolores, il faut donc connaître le nombre de feux présents tout au long de la route étudiée ainsi que le type de chaque feu à installer. Le besoin électrique des feux tricolores va donc être la somme des multiplications entre le nombre et la puissance de chaque type. Chaque type représente une caractéristique de signalisation, comme nous le montre le tableau 4.

Type	Caractéristiques	Puissance en Watt
1	Feux tricolores (diamètres de lentilles : 100mm)	55
2	Feux tricolores (diamètres de lentilles : 200mm)	60
3	Feux tricolores (diamètres de lentilles : 300mm)	65
4	Feux piétons	50

Tableau 4 : Différents types des feux de signalisation

Le besoin électrique des feux tricolores va donc être la somme des multiplications entre le nombre et la puissance de chaque type (tableau 4) :

$$BF = \sum N_{type1} * P_{type1} + N_{type2} * P_{type2} + N_{type3} * P_{type3} + N_{type4} * P_{type4}$$

Avec la même méthode que précédemment, le besoin des panneaux lumineux sera déterminé par leur nombre tout au long de la route étudiée et par leur type. Nous allons répartir les différents panneaux en suivant 2 types, les panneaux de petite taille, installés généralement sur les routes de villes et les panneaux de grande taille, qui sont sur les 2*2 voies et autoroutes.

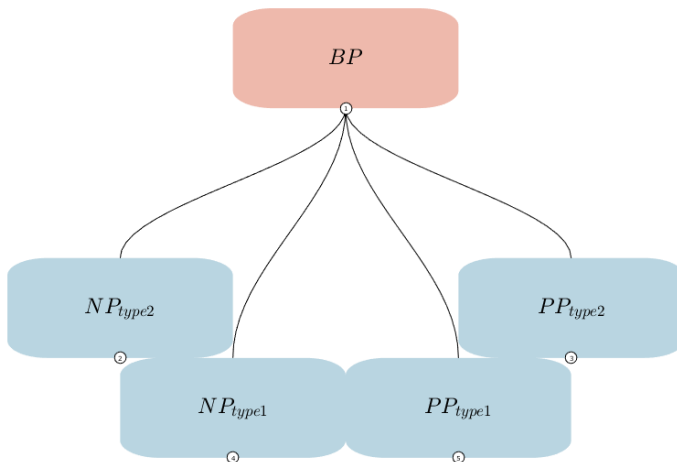
Type	Caractéristiques	Puissance en Watt
1	panneaux de petite taille	20
2	panneaux de grande taille	40

Tableau 5 : Puissance de chacun des types de panneaux de signalisations

Les besoins électriques des panneaux de signalisation lumineux vont donc être la somme des multiplications entre le nombre et la puissance de chaque type :

$$BP = \sum N_{type1} * P_{type1} + N_{type2} * P_{type2}$$

Voici le modèle mathématique (modélisation 2) réalisé avec Toaster pour les besoins électriques des panneaux de signalisation (BP). Les variables de ce modèle sont le nombre de panneaux de signalisation.

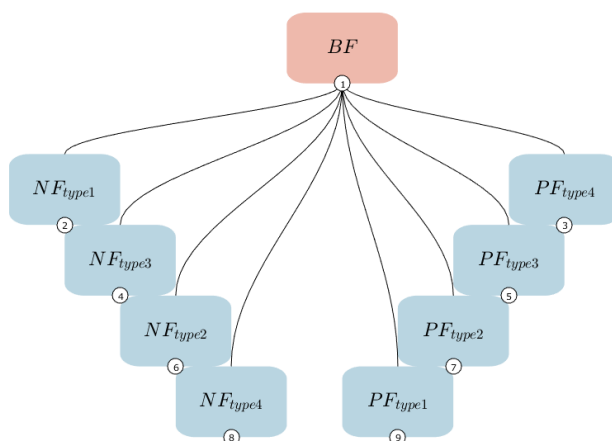


BP : Besoin électrique des panneaux de signalisation en W	
1	$BP = NP_{type1} \cdot PP_{type1} + NP_{type2} \cdot PP_{type2}$
2	NP_{type2} : Nombre de panneaux de signalisation de type 2
3	$0 \leq NP_{type2} \leq 10$
4	PP_{type2} : Puissance des panneaux de signalisation de type 2 en unité
5	$PP_{type2} = 40$
6	NP_{type1} : Nombre de panneaux de signalisation de type 1
7	$0 \leq NP_{type1} \leq 10$
8	PP_{type1} : Puissance de panneaux de signalisation de type 4 en W
9	$PP_{type1} = 20$

Modélisation 2 : Besoin des panneaux de signalisation

Prenons le cas où deux panneaux de type 1 et un panneau de type 2 doivent être installés. On aurait un besoin de 4800Wh.

Le modèle mathématique des besoins électriques des feux de signalisation (BF), se situe ci-dessous (modélisation 3). Il dépend du nombre de feux de signalisation, qui est une variable et de la puissance de chaque type de feux.



BF : Besoin électrique des feux de signalisation en W	
1	$BF = NF_{type1} \cdot PF_{type1} + NF_{type2} \cdot PF_{type2} + NF_{type3} \cdot PF_{type3} + NF_{type4} \cdot PF_{type4}$
2	NF_{type1} : Nombre de feux de signalisation de type 1
3	$0 \leq NF_{type1} \leq 10$
4	PF_{type4} : Puissance des feux de signalisation de type 4 en W
5	$PF_{type4} = 50$
6	NF_{type3} : Nombre de feux de signalisation de type 3
7	$0 \leq NF_{type3} \leq 10$
8	PF_{type3} : Puissance des feux de signalisation de type 3 en W
9	$PF_{type3} = 65$
10	NF_{type2} : Nombre de feux de signalisation de type 2
11	$0 \leq NF_{type2} \leq 10$
12	PF_{type2} : Puissance des feux de signalisation de type 2 en unité
13	$PF_{type2} = 60$
14	NF_{type4} : Nombre de feux de signalisation de type 4
15	$0 \leq NF_{type4} \leq 10$
16	PF_{type1} : Puissance de feux de signalisation de type 4 en W
17	$PF_{type1} = 55$

BF
Définition de la fonction Nouveau



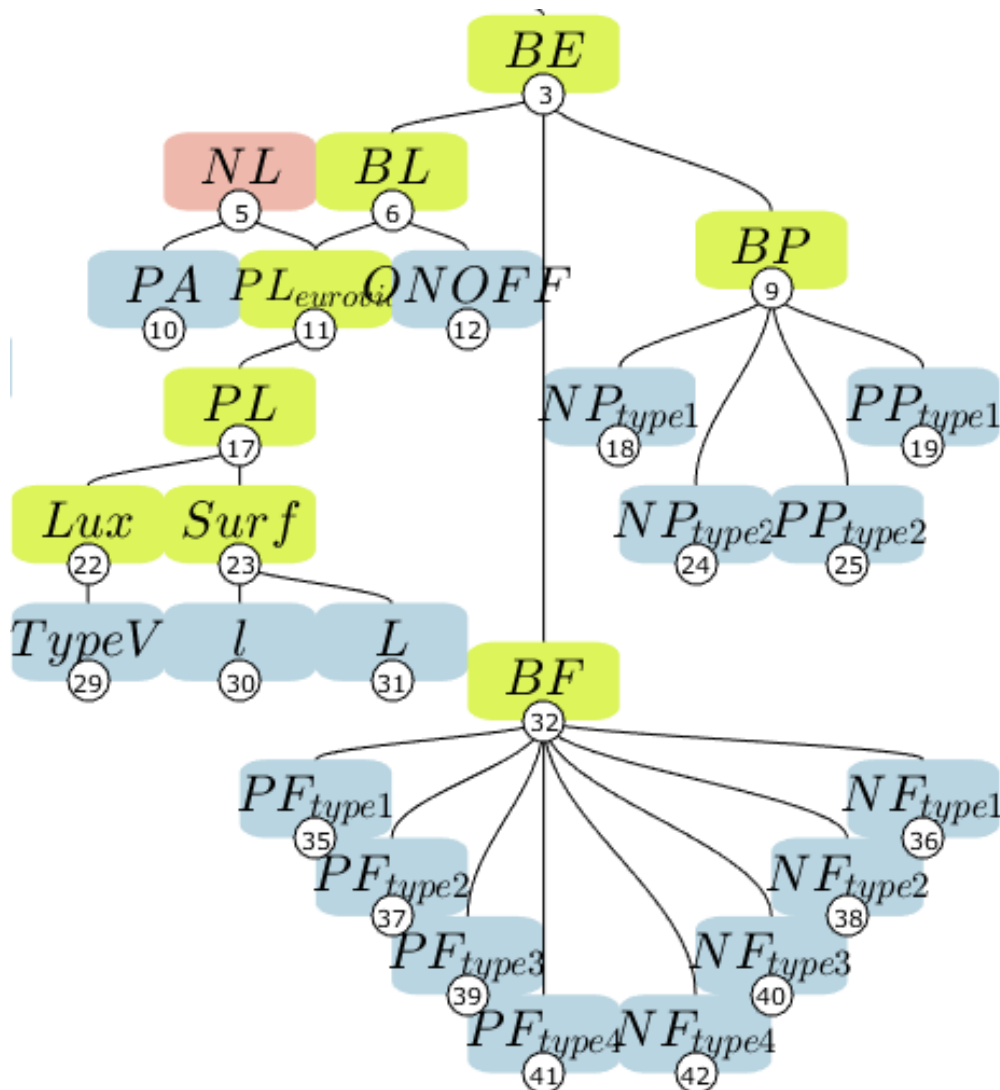
Modélisation 3 : Besoin des feux de signalisations

Dans le cas où seulement deux feux de signalisations de type 2 et deux feux de signalisations de type 3 doivent être installés le besoin serait de 15000Wh.

Ces deux modèles mathématiques permettent d'obtenir rapidement la puissance nécessaire à fournir afin de répondre à l'ensemble des besoins électriques des feux et des panneaux de signalisations.

1.3. Un système mathématique pour connaître le besoin électrique des infrastructures routières

Afin d'apporter un premier élément de réponse à notre problématique concernant le besoin électrique des infrastructures routières, on associe l'ensemble des trois modèles mathématiques, du besoin des lampadaires, des feux de signalisation et des panneaux de signalisation. Nous obtenons le modèle qui se trouve ci-dessous. Les résultats de ce modèle varient en fonction des caractéristiques de la voirie (longueur, largeur, type), du nombre de panneaux de signalisation et du nombre de feux de signalisation.



Modélisation 4 : Besoin électrique des infrastructures routières

Dans le cas où nous reprenons les valeurs de nos exemples, le besoin électrique serait de $7.6 \cdot 10^6 \text{Wh}$. On peut noter que les besoins des feux et des panneaux de signalisations sont négligeables devant les besoins de l'éclairage public. L'éclairage public a donc un besoin très important.

Comme nous cherchons à savoir si la piézoélectricité, accompagnée de l'innovation Lumi+, peut produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins des voiries, il fallait tout d'abord définir les besoins en électricité des voiries. Dans cette première partie nous avons donc vu, ce que sont réellement ces besoins électriques, et quelle est leur puissance à couvrir. En créant des modèles mathématiques séparés, il est donc possible de connaître ce que chaque type d'installation consomme, et le modèle mathématique général, permet, en fonction des caractéristiques de la voirie, de calculer exactement la consommation électrique de celle-ci.

Nous avons vu dans cette première partie l'ensemble des besoins en électricité des infrastructures routières, en donnant des définitions, des valeurs et enfin un modèle mathématique pour chacun de ces besoins. Les trois modèles mathématiques peuvent être utilisés séparément pour connaître les besoins spécifiques à chaque installation, mais aussi assemblés afin de connaître le besoin en électricité des routes, qui dans notre étude devra être couvert par la piézoélectricité.

2. La faible production électrique du flux de véhicules par la piézoélectricité

Nous nous sommes intéressés dans la première partie aux besoins électriques des infrastructures routières. Nous allons maintenant étudier, afin d'avoir toutes les caractéristiques permettant de répondre à notre problématique, la production électrique du flux de véhicules par la piézoélectricité.

2.1. La piézoélectricité, vraiment si productive ?

Afin de répondre le plus précisément à la problématique de départ, il faut dans un premier temps définir la piézoélectricité. Et dans un deuxième temps, nous verrons que la piézoélectricité est une énergie faiblement productive, en donnant les formules nécessaires à calculer sa production et en créant un modèle mathématique pour illustrer les différentes formules.

2.1.1. La piézoélectricité, énergie renouvelable

La piézoélectricité est une source d'énergie renouvelable dont le principe est de produire de l'électricité grâce à une pression exercée sur un matériau piézoélectrique. La piézoélectricité peut fonctionner grâce à la propriété que possèdent certains corps à se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (Giovanni et al., 2010).

Dans des cas concrets, lorsqu'un marcheur passe sur une dalle piézoélectrique (figure 4), celui-ci exerce une pression sur un cristal qui se déforme et crée une tension électrique.

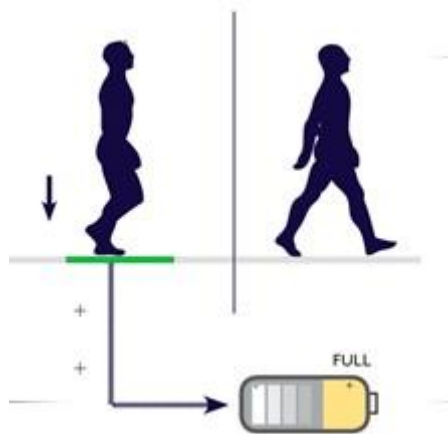


Figure 5 : Principe piézoélectrique

Source : Piézoélectricité.com

La piézoélectricité a une durée de vie illimitée. Elle existe sous de multiples formes dans la vie courante. Par exemple, dans les briquets ou encore les allume gaz, l'étincelle permettant de former une flamme est créée grâce à la pression exercée sur un matériau piézoélectrique. Les principaux matériaux piézoélectriques que l'on peut citer sont le quartz, la topaze, la tourmalite ou encore la berlinite.

Nous venons de définir la piézoélectricité en démontrant son fonctionnement, qui se réalise par la transformation d'une compression physique en une tension électrique.

2.1.2. La faible production piézoélectrique

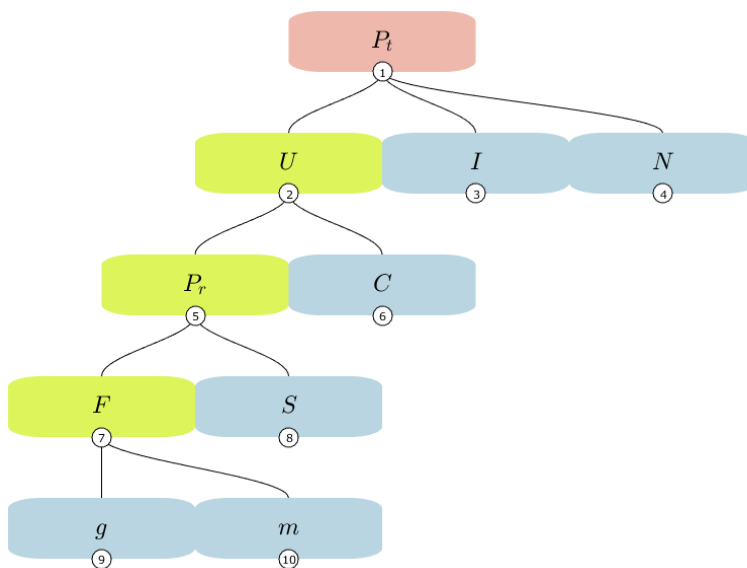
Afin d'aller plus loin dans la définition de la piézoélectricité, nous allons voir dans cette partie que celle-ci ne produit que faiblement de l'électricité.

On obtient une production piézoélectrique lorsqu'une pression s'applique sur un cristal (quartz, topaze, tourmalite ou berlinite). Dans notre cas, c'est le flux de véhicules qui doit fournir de l'électricité donc c'est le passage d'un véhicule qui va exercer une pression sur le cristal.

La variable qui va directement jouer sur la pression exercée sur le cristal est donc la masse du véhicule. La masse du véhicule multipliée par l'accélération de pesanteur donne une force qui s'applique sur la dalle. Pour obtenir la pression, il faut diviser cette force par la surface d'appui du véhicule (Tugdual LOYER, 2016).

Cette pression doit être multipliée par la constante piézoélectrique pour obtenir la tension provoquée par la compression du cristal piézoélectrique. La puissance piézoélectrique recherchée est donc obtenue grâce à la tension et l'intensité qui ressort de cette dalle (Récupération de l'énergie bio-mécanique par des systèmes piézoélectriques, Vincent BARTH et al.).

Le modèle mathématique (modélisation 5) nous montre la puissance piézoélectrique qu'il est possible de récupérer par le passage d'un véhicule sur un nombre de dalles piézoélectrique déterminées.



P_t : Puissance piezoelectrique en W	
1	$P_t = U.I.N$
U : Tension en V	
2	$U = P_r.C$
I : Intensité en A	
3	$I = 0.05$
N : Nombre de dalle en unité	
4	$1 \leq N \leq 10$
P_r : Pression s'appliquant sur une dalle en Pa	
5	$P_r = F/S$
C : Constante piezoelectrique en unité	
6	$C = 0.63$
F : Force d'un véhicule en N	
7	$F = g.m$
S : Surface d'appui d'un véhicule en m^2	
8	$S = 2$
g : constante de gravitation en N/kg	
9	$g = 9.81$
m : masse d'un véhicule en g	
10	$1500 \leq m \leq 3000$

Modélisation 5 : Production piézoélectrique d'un véhicule

Prenons le cas d'un véhicule d'une masse d'environ 1500 kg qui circule sur une dalle piézoélectrique constituée de cristal de quartz (le plus courant). Son passage fournit une puissance de 231W, ce qui est donc une très faible puissance en comparaison aux besoins nécessaires (voir parties précédentes). Il faut cependant prendre en compte le flux de véhicules qui peut être important et donc augmenter considérablement la puissance piézoélectrique.

Le résultat précédent nous montre que le passage d'un seul véhicule sur une dalle offre une production d'une centaine de Watts, ce qui est faible comparé aux besoins des infrastructures routières.

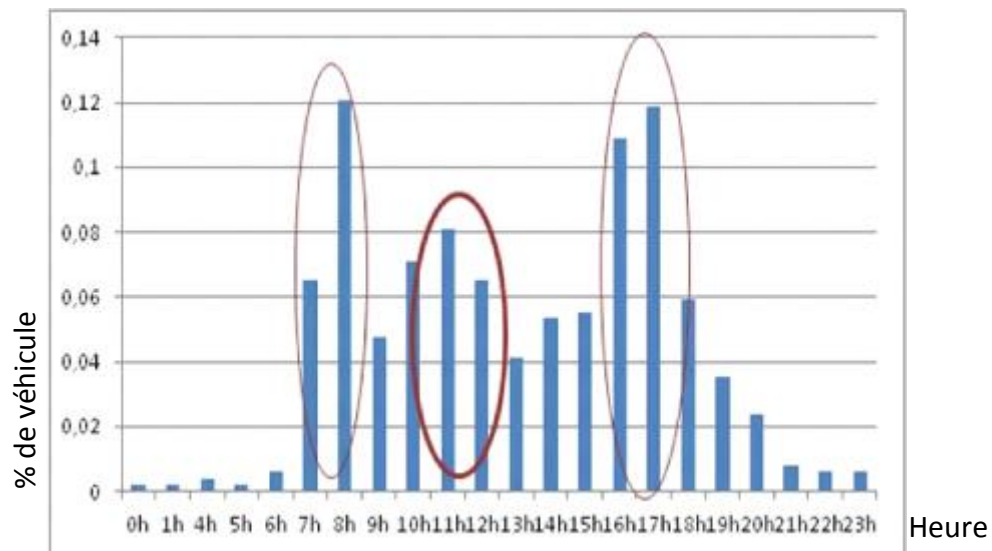
2.2. Le flux de véhicules, fournisseur de piézoélectricité

Afin de conclure sur l'usage de la piézoélectricité sur les infrastructures routières, il est nécessaire de coupler le modèle mathématique de la production piézoélectrique d'un véhicule avec le flux de véhicules d'une route. Nous allons donc voir, que le flux de véhicules est donc le véritable fournisseur de piézoélectricité.

La circulation routière est le déplacement de véhicules automobiles sur une route. On peut définir celle-ci par la mesure du débit de circulation en comptant le nombre de véhicules pendant une période de temps. L'unité la plus employée est le nombre de véhicules par jour. Pour notre cas d'étude, la RD97, les données disponibles sur le flux de véhicules sont fournies par GéoLoiret. GéoLoiret relève le trafic journalier sur chaque route du département. Il compte donc le nombre de véhicule circulant par jour sur la voirie, et en fait une moyenne sur l'année. GéoLoiret propose une carte où l'on peut voir, en cliquant, combien de voitures circulent par jour sur la route sélectionnée.

Dans notre étude, le flux de véhicules est très important. Plus ce flux sera grand, c'est-à-dire que de nombreux véhicules emprunteront la voirie, plus les dalles piézoélectriques capteront de l'énergie, et fourniront donc de l'électricité. La production piézoélectrique est donc directement liée au flux de véhicules.

Les mobilités des français dans les grandes villes françaises, se décomposent en 3 pics bien distincts les uns des autres. Les pics sont proportionnels à la population qui effectue des trajets domicile-travail. On retrouve donc un premier pic le matin, un second aux alentours de midi, et un troisième plus étalé le soir. Dans une étude réalisée à Poitiers (Simmala, 2013), on retrouve ces 3 pics : le graphique 2 montre le pourcentage de véhicules circulant à chaque heure. Cela permet de passer d'un nombre de véhicules journaliers à un nombre de véhicules par heure, en appliquant les pourcentages. Par exemple, si 100 véhicules ont circulé sur la voirie pendant un jour J, 12% d'entre eux sont passés sur la voirie entre 8h et 9h.

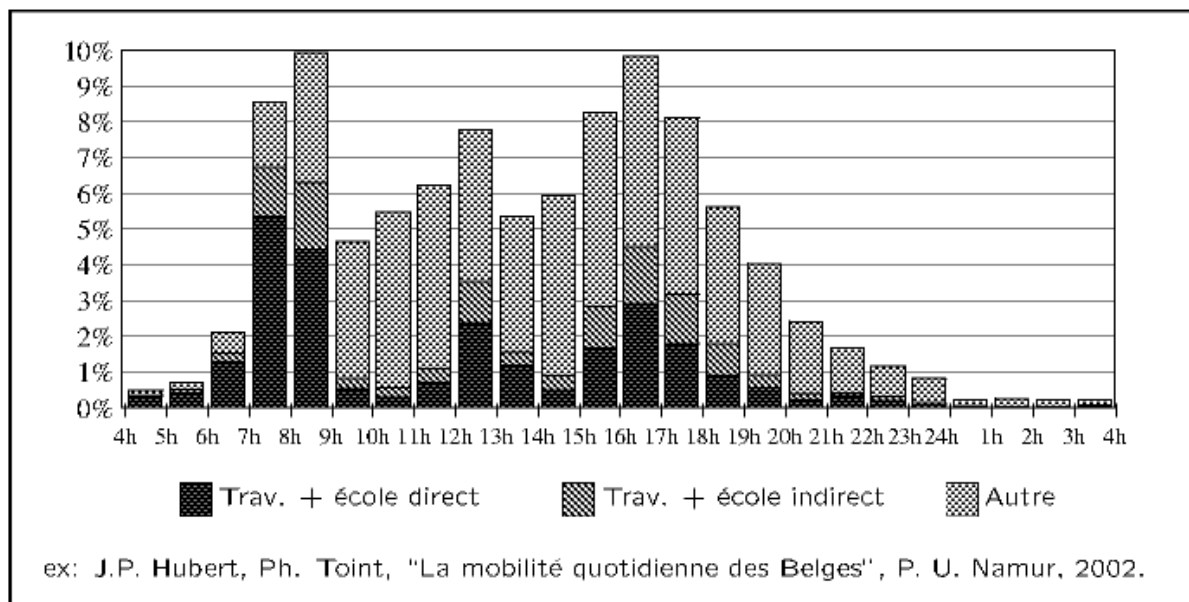


Graphique 2 : Distribution horaire des mobilités automobiles sur une voirie pendant une journée moyenne à Poitiers.

Source : Koulntè SIMMALA, 2013

Afin de confirmer les résultats trouvés par l'étude réalisée à Poitiers (Graphique 2), il est possible de comparer ceux-ci avec l'étude réalisée en Belgique (Cirillo et al., 2004). On retrouve bien les 3 pics distincts. Les pourcentages sont très proches entre les deux études : leurs résultats diffèrent de 1 à 2%. Il est donc possible d'appliquer les pourcentages de l'étude réalisée à Poitiers, ville semblable à Orléans.

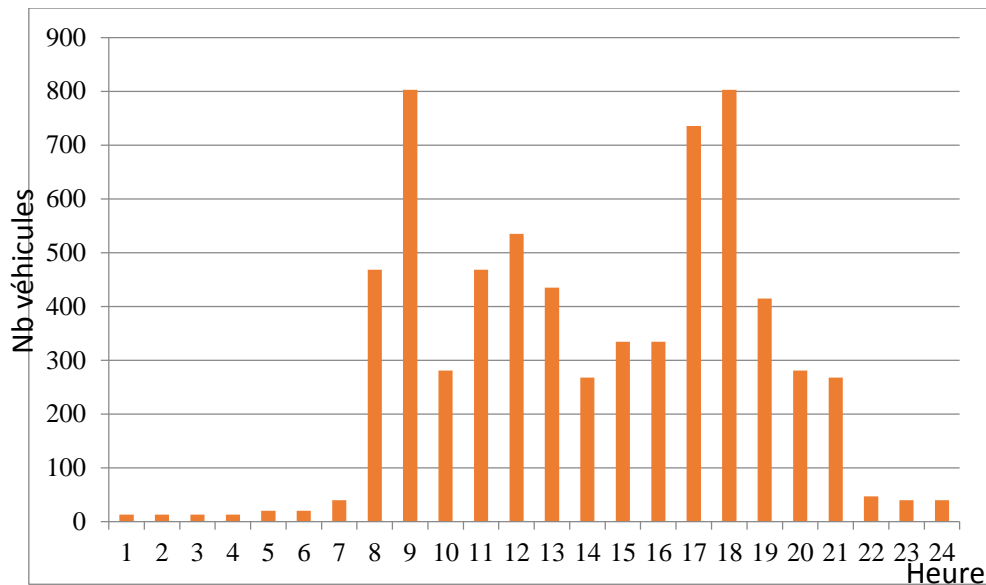
Figure 1 : Distribution horaire des déplacements pour le travail et l'école, un jour ouvrable scolaire



Graphique 3 : Distribution horaire des déplacements en Belgique

Source : Hubert, 2004

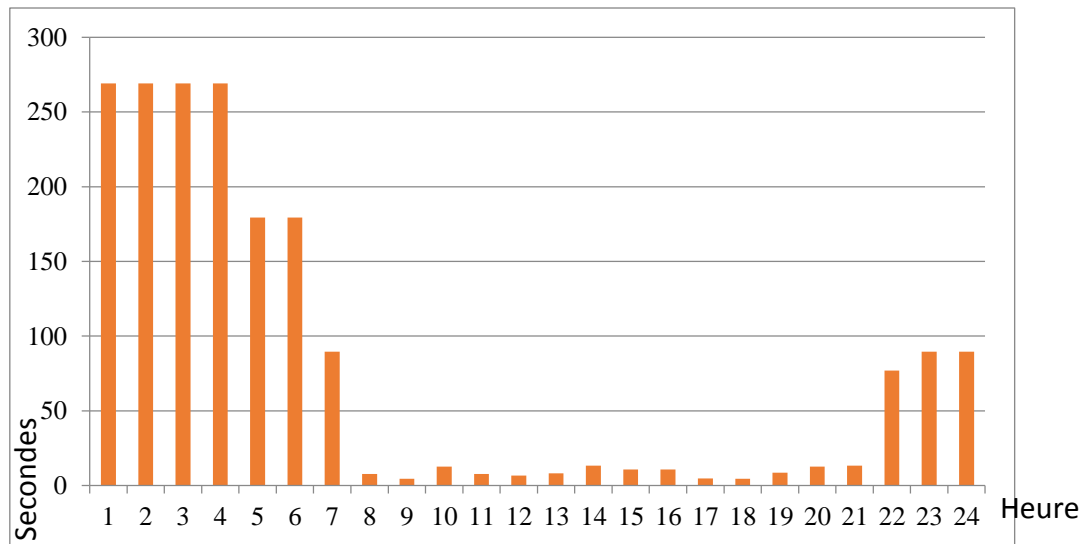
Dans notre cas, nous allons reprendre les pourcentages de l'étude réalisée à Poitiers que nous allons appliquer aux données de GeoLoiret, qui a relevé la moyenne de flux sur l'ensemble des routes du Loiret. En effet, sur l'année 2015, en moyenne, 6689 véhicules ont circulé par jour sur la RD97. En appliquant les pourcentages du graphique 2 à la valeur de la RD97 du nombre de véhicules quotidien, on obtient le graphique 4. Pour le pic le plus important, qui est de 12% de véhicules, on trouve que 800 véhicules circulent sur la RD97 entre 8h et 9h.



Graphique 4 : Flux de véhicules sur la RD97

Réalisation : Clément Junquet

Bien que le nombre de véhicules par heure soit important, le nombre de secondes séparant chaque véhicule (graphique 5) est lui, du point de vue des dalles piézoélectriques, plus parlant. En effet, les dalles piézoélectriques produisent de l'énergie à chaque passage de véhicule donc plus le nombre de secondes séparant chaque véhicule sera grand et moins les dalles piézoélectriques produiront d'électricité. Comme il est possible de lire sur le graphe, lors de notre pic de 9h, où circulent 800 véhicules par heure, on note un temps qui sépare chaque impulsion des dalles piézoélectriques d'environ 4 secondes. Les dalles piézoélectriques produiront donc de l'électricité toutes les 4 secondes.



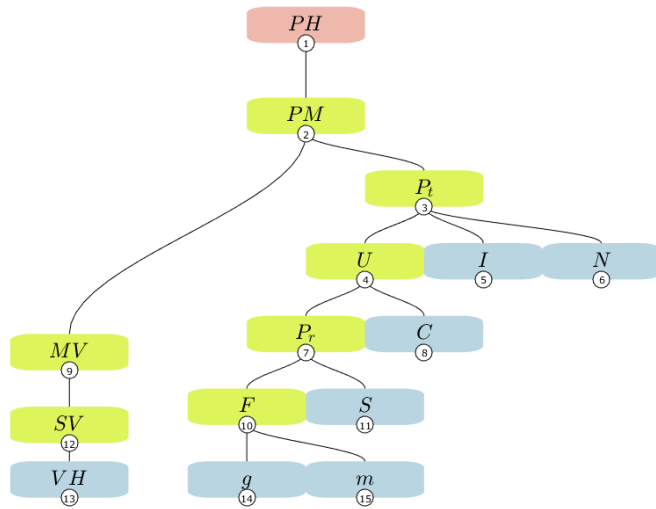
Graphique 5 : Nombre de secondes séparant chaque impulsion piézoélectrique

Réalisation : Clément Junquet

Nous venons donc de voir que plus le flux de véhicules sera important plus il sera possible de produire de la piézoélectricité. En effet, celle-ci dépend du passage des véhicules sur les dalles.

2.3. Un système mathématique, pour voir la production piézoélectrique du flux de véhicules

Afin de relier le flux de véhicule à la piézoélectricité, il est possible de créer un modèle mathématique qui donne la puissance piézoélectrique en fonction du flux de véhicules qui circule sur la route.



PH : Production par heure - en Wh	1	$PH = 60.PM$
PM : Production par minutes en unité	2	$PM = MV.P_t$
P_t : Puissance piezoélectrique - en W	3	$P_t = U.I.N$
U : Tension - en V	4	$U = P_r.C$
I : Intensité - en A	5	$I = 0.05$
N : Nombre de dalle - en unité	6	$1 \leq N \leq 10$
P_r : Pression s'appliquant sur une dalle - en Pa	7	$P_r = F/S$
C : Constante piezoélectrique en unité	8	$C = 0.63$
MV : Nombre de minutes - en unité	9	$MV = 60/SV$
F : Force d'un véhicule en N	10	$F = g.m$
S : Surface d'appui d'un véhicule en m ²	11	$S = 2$
SV : Nombre de seconde entre chaque véhicules en Seconde/Veh	12	$SV = 3600/VH$
VH : Flux de véhicule - en Veh/h	13	$10 \leq VH \leq 900$
g : constante de gravitation - en N/kg	14	$g = 9.81$
m : masse d'un véhicule en g	15	$1500 \leq m \leq 3000$

Modélisation 6 : Production piézoélectrique en fonction du flux de véhicule

En reprenant le modèle mathématique de la production piézoélectrique d'un véhicule et en y ajoutant le flux de véhicules sur la route, nous pouvons obtenir le modèle qui suit (modélisation 6). Ce modèle nous permet d'accéder la puissance piézoélectrique que l'on peut avoir lorsqu'un flux de véhicules circule sur une route.

Ce modèle permet donc d'obtenir toutes les caractéristiques pour répondre à la problématique en ayant la production piézoélectrique en fonction d'un flux de véhicules, sachant qu'à la partie précédente nous avons déterminé le besoin électrique d'une infrastructure.

Dans cette deuxième partie, nous avons vu que la piézoélectricité dépend du flux de véhicules. En effet, plus celui-ci est fort plus la production piézoélectrique sera importante. Cependant, la piézoélectricité produit faiblement.

3. La production piézoélectrique par flux de véhicules, mauvaise idée pour couvrir le besoin en électricité des infrastructures routières

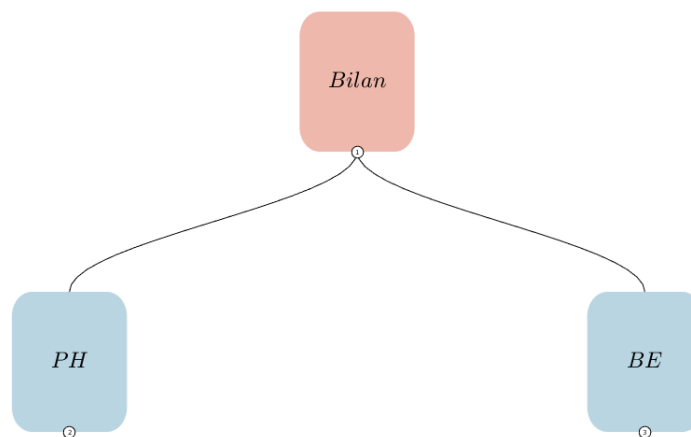
Dans les première et deuxième parties nous avons déterminé les besoins électriques d'une infrastructure routière en fonction de ses caractéristiques et la puissance que peut fournir un flux de véhicules en passant sur des dalles piézoélectriques.

Rappelons notre problématique : « Bien que le flux automobile permette de produire de l'électricité, la piézoélectricité, accompagnée de l'innovation Lumi+, peut-elle produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins des voiries, sans stockage de l'énergie ? » Nous avons donc toutes les données pour y répondre.

Premièrement, nous allons assembler deux modèles mathématiques créés précédemment pour répondre précisément à la problématique. Deuxièmement, nous allons créer une application destinée aux conducteurs de travaux pour déterminer instantanément s'il est possible ou pas d'utiliser la piézoélectricité en fonction des caractéristiques de la voirie. Enfin, nous analyserons les résultats.

3.1. Un système mathématique pour calculer la réponse de la piézoélectricité face à des besoins spécifiques

En assemblant les différents modèles que nous avons obtenus dans les parties précédentes, nous obtenons la modélisation 7. Ce modèle permet d'obtenir le pourcentage de besoins couverts par la piézoélectricité afin de répondre précisément à la problématique



Modélisation 7 : Bilan entre production et besoin électrique

La liaison entre le modèle des besoins et le modèle de la production permet d'obtenir le pourcentage de besoins couvert par la production.

$$Bilan = \frac{\text{Production}}{\text{Besoins}} * 100$$

3.2. La création d'une application pour analyser l'impossibilité de couvrir les besoins électriques par la piézoélectricité, mais aussi comme outil de dimensionnement pour le conducteur de travaux

Afin de simplifier l'utilisation de ce modèle mathématique et d'analyser plus facilement les résultats, il est possible de créer une application (modélisation 6). Celle-ci a pour but de permettre aux utilisateurs, et notamment aux conducteurs de travaux, d'obtenir rapidement les résultats concluant sur la possibilité ou non de proposer la piézoélectricité aux clients.

Deuxièmement l'application permet de déterminer, même si la piézoélectricité n'est pas possible, le nombre de lampadaires qu'il faut installer le long de la route pour obtenir la luminosité requise pour les caractéristiques de la voirie.

L'application permet à l'utilisateur de configurer les différents paramètres suivant trois onglets. Le premier, en haut à gauche, permet de régler les caractéristiques des feux de signalisation (nombre de feux de chaque type), des panneaux de signalisation (nombre de feux de chaque type), de l'éclairage (puissance ampoule, ON/OFF), des dalles piézoélectriques et le flux de véhicules (nombre de dalles, nombre de véhicules / heure), et enfin le type de voirie (chemin, rue, route, 2*2 voie, Autoroute). Le second, en bas, permet de modifier les caractéristiques de la voirie (largeur, longueur, type de voirie). Et enfin, le troisième, sert à connaître les besoins des panneaux, des feux et de l'éclairage public ainsi que le nombre de Lux à fournir pour avoir une luminosité optimale.

Et enfin, le pourcentage de besoin couvert par la piézoélectricité s'affiche en haut à droite avec le nombre de lampadaires à installer.

En rentrant l'ensemble de ces paramètres, l'application lance le modèle de calcul présenté ci-dessus (modélisation 5), et affiche le pourcentage de besoins en électricité des infrastructures routières couvert par le flux de véhicule circulant sur les dalles piézoélectriques. Et enfin l'application affiche le nombre de lampadaires qu'il est nécessaire d'installer pour obtenir une luminosité suffisante suivant les caractéristiques de la voirie.

Modélisation 8 : Application

A partir du modèle mathématique, nous avons réalisé une application pour analyser l'impossibilité de couvrir les besoins électriques par la piézoélectricité, mais aussi comme outil de dimensionnement pour le conducteur de travaux, pour notamment le nombre de lampadaires à installer.

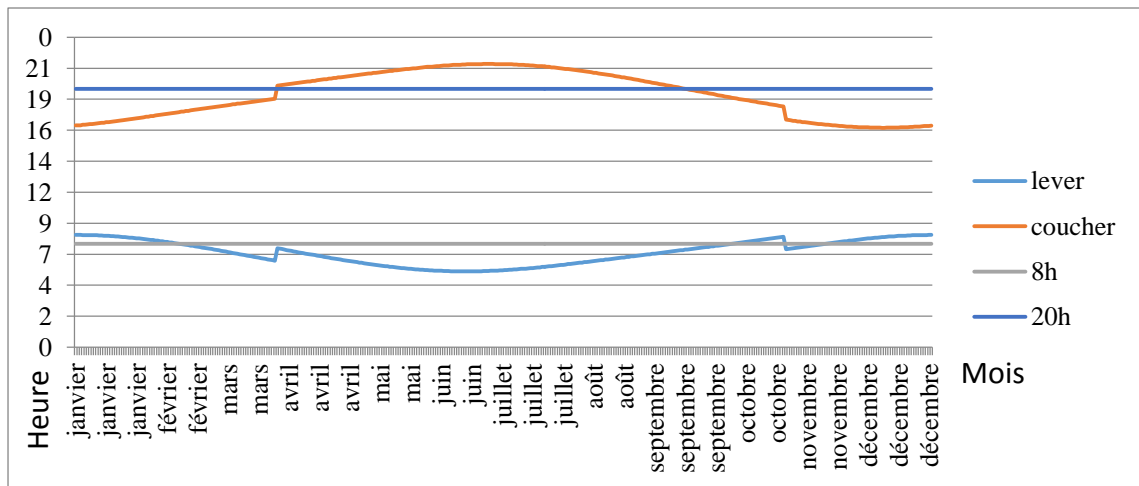
3.3. Le décalage horaire entre production et besoins, première incompatibilité

Tout d'abord, il faut relever qu'il y a un décalage entre la possibilité de production électrique et le besoin des lampadaires. En effet, le graphique 6 montre le pic du flux de véhicules et les heures de lever et coucher de soleil. L'heure maximale du lever du soleil est 8h42, or le pic du flux de véhicules se situe aux alentours de 9h.

Le pic de flux de véhicules le soir, qui se situe aux alentours de 18h, ne nécessite de l'éclairage public qu'entre novembre et février.

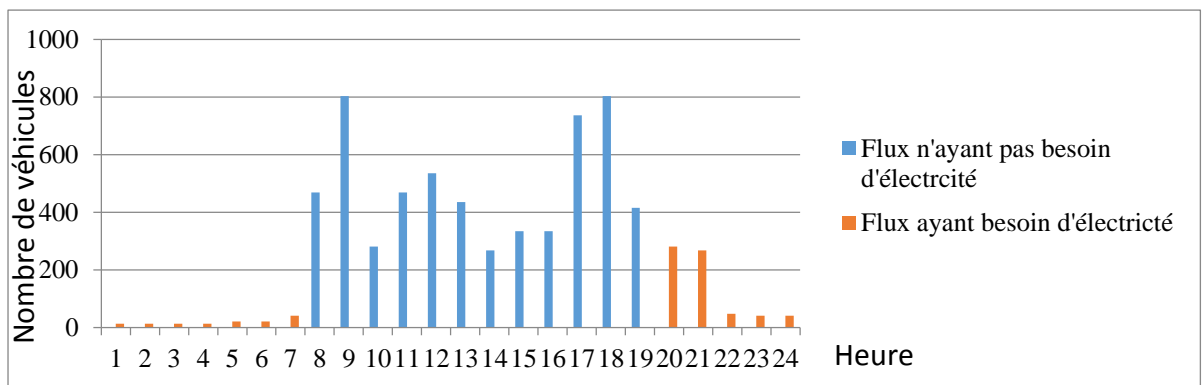
En heure d'été, aucun flux important ne nécessite d'éclairage. Seuls, les quelques véhicules circulant la nuit ont un besoin d'éclairage.

Enfin, nous pouvons voir, sur le graphique 7, les flux ayant besoin d'électricité représentés en orange. Or les flux de 0h à 7h sont très faibles, nous verrons dans la partie suivante que ces faibles flux ne permettent pas de produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins. De même pour les flux à partir de 20h.



Graphique 6 : Horaire du lever et coucher de soleil avec les premiers flux importants

Réalisation : Clément Junquet



Graphique 7 : Flux ayant un besoin d'électricité

Réalisation : Clément Junquet

Nous venons donc de voir dans cette partie que le décalage horaire entre la production et les besoins des infrastructures routières est la première incompatibilité entre la piézoélectricité et le flux de véhicules.

3.4. Le faible pourcentage couvert par la piézoélectricité

Prenons tout d'abord le cas maximal (bien que impossible à cause du décalage entre le temps de production et les besoins), qui dans notre cas est de 800véh/heure, avec une voirie de 5m de large et 600m de long. On décide d'installer, arbitrairement, 10 dalles piézoélectriques. De plus nous fixons le nombre de feux et de panneaux à 0, pour voir si la piézoélectricité peut couvrir les besoins de l'éclairage public (dans le cas où le flux est très important). En fixant l'ensemble de ces paramètres, on note que ce flux permettrait de couvrir 96% des besoins de l'éclairage public. La piézoélectricité peut donc couvrir les besoins de l'éclairage si le flux est supérieur à 600 véhicules par heure, comme l'a annoncé la Dr Lucy Edery-Azulay

Cependant, dans notre cas, le plus fort flux, lorsqu'il y a un besoin en éclairage public est d'environ 200 véhicules/heure. Ce flux permet de couvrir seulement 20% des besoins. Or ce flux correspond uniquement aux passages à 20h et 21h. Pour tous les autres horaires où le flux est compris entre 10 et 50 véhicules/heure, les besoins ne sont couverts que de 2%. La piézoélectricité est alors négligeable.

Nous venons de voir que le flux de véhicules ne permet pas de produire assez d'énergie pour les besoins de l'éclairage public. Regardons s'il suffit pour les besoins des feux de signalisation et des panneaux de signalisation uniquement. Si l'on installe 3 feux de type 1 et 2 panneaux de type 2, par exemple, le flux de véhicules permet de couvrir l'intégralité des besoins. Cependant, bien que ce flux permette de couvrir ces quelques besoins, la sécurité de la couverture des besoins n'est pas assurée. En effet, les flux de véhicules sont très faibles à ces horaires, et peuvent donc être répartis à de grands intervalles, une longue absence de passages de véhicules peut alors nuire au bon fonctionnement de ces dispositifs.

Dans cette troisième partie, nous avons ressorti les limites de la piézoélectricité. La première de celles-ci est le décalage horaire entre la production et les besoins. Ensuite, la création d'un modèle mathématique permet connaître le pourcentage des besoins électriques couvert par la piézoélectricité. De ce modèle, il est possible de réaliser une application qui permet aux utilisateurs de rentrer les caractéristiques de la voirie et de voir instantanément si la piézoélectricité couvre les besoins de la voirie, mais aussi le nombre de lampadaires à installer.

Conclusion

La piézoélectricité ne peut donc pas produire suffisamment pour couvrir les besoins en électricité des infrastructures routières. En effet, le décalage entre le temps de production et les besoins est trop important pour mettre en place de telles installations. De plus, l'incertitude sur le flux nocturne de véhicules ne permet pas de garantir une sécurité pour les usagers.

Un système de stockage ne peut pas être combiné à la production piézoélectrique. Le stockage, comme les batteries de téléphone ou de voiture électrique, demande de longues durées (quelques heures) pour se recharger. Or, même un important flux de véhicules ne permet pas de fournir de l'électricité aux systèmes de stockage sur des temps suffisamment longs pour que ceux-ci puissent se recharger. Le passage d'un véhicule sur une dalle piézoélectrique offre que de très courtes impulsions électriques, le temps du passage du véhicule sur la dalle. Des recherches peuvent donc être menées pour trouver des systèmes de stockage rapide.

Enfin, la piézoélectricité nécessite, par définition, la déformation d'un matériau sous l'effet d'une contrainte mécanique. Les dalles piézoélectriques transforment l'énergie nécessaire à la déformation de ce cristal en électricité. Un humain qui marche sur une dalle piézoélectrique fournit un effort. De la même façon, les véhicules doivent donc fournir aussi un effort. Ceci entraîne une surconsommation des véhicules pour assurer la transformation de l'énergie combustible (pétrole) en électricité. L'impact environnemental n'est donc pas réduit. La question de la piézoélectricité doit donc se poser sur la seule énergie qui n'est pas « compensable », celle de l'homme. Il faudrait alors étudier la piézoélectricité sur des grandes allées piétonnes. En effet, dans le cadre de la re-piétonnisation des centres villes, l'installation de dalles piézoélectriques peut être intéressante pour offrir aux citadins de l'électricité en borne par exemple⁶, leur permettant de recharger leurs appareils mobiles.

⁶ Une station de métro à Tokyo teste un tapis générateur d'électricité pour alimenter les bornes de validation des tickets. À Gloucester, un parking de supermarché a équipé ses ralentisseurs de capteurs piézoélectriques pour alimenter les caisses de paiement. On trouve également quelques boîtes de nuit qui ont décidé de générer de l'électricité à partir de leurs pistes de danse. <http://www.logic-immo.be/fr/nouvelles-immo/piezoelectricite-le-pave-generateur-d-energie-961.html>

Bibliographie

Ouvrage :

COUILLET Roger. Guide des bonnes pratiques, Eclairages des espaces publics. Editions Le moniteur. Aout 2014. 207 pages.

BOURRIER Régis. Pratique des VRD et aménagement urbain : voirie et réseaux durables. Edition Le moniteur. 2012. 973 pages.

NARBONI Roger. By night : lumière et architecture. 2008. Edition : Loft cop. 216 pages

COLOMBIER Jean Marie. Eclairage public : répertoire des textes officiels et des normes. Edition : Ministère de l'Equipeement, des Transports et du Logement, Centre d'Etudes sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques. 1997. 44 pages.

Manuel et guide technique

Science et vie, Mai 2016, dossier sur les routes photovoltaïque de Colas

Guide pour la conception de l'éclairage public en milieu urbain. Edition : CETUR. 14 pages.

Dossier de Presse WattWay, 2014

Webographie et Articles en ligne :

Piézoélectricité, Birolini Giovanni ; Durgniat Matthieu ; Huggenberger Shadia ; Mars 2010 (Octobre 2016).

http://www.energie-klimawerkstatt.ch/fileadmin/projects/2010/bobst3/Bobst_PiezoElectrique.pdf

Récupération de l'énergie bio-mécanique par des systèmes piézoélectriques ; Vincent BARTH, Laurent HETRU, Baptiste RAVINEL (Octobre 2016).

http://jdedinechin.free.fr/rapports%20%C3%A9tudiants%202011/biomecanique%20piezo_barth_hetru_ravinel-doc.pdf

La Piézoélectricité, le pavé générateur d'énergie. (Octobre 2016).

<http://www.logic-immo.be/fr/nouvelles-immo/piezoelectricite-le-pave-generateur-d-energie-961.html>

Travaux de recherches étudiants sur des trottoirs piézoélectriques. (Octobre 2016).

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD1011/bei/beiere/groupe1/node/65>

Etude de l'effet piézoélectrique ; Tugdual Loyer ; 2016 (Octobre 2016).

<https://seminairematériaux.files.wordpress.com/2016/01/etude-de-leffet-pic3a9zoc3a9lectrique.pdf>

Les routes de 5^{ème} générations. (Octobre 2016).

<http://www.snptri.com/ile-de-france/wp-content/uploads/2015/03/Pour-la-Science-N-450-Avril-2015-EXTRAIT.pdf>

Récupération d'énergie vibratoire à électrets (Octobre 2016).

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00644697v1/document>

Modélisation Hybride dynamique de flux de trafic (Octobre 2016).

https://www.researchgate.net/profile/Hassane_ABOUAISSA/publication/281530926_Modlis-ation_hybride_dynamique_de_flux_de_trafic/links/55f6bd2108aeba1d9eed79cb.pdf

Conjoncture économique dans le secteur du BTP. (Septembre 2016).

http://www.lemonde.fr/economie/article/2015/03/25/huit-ans-de-deprime-pour-le-btp_4600630_3234.html

Enquête trimestrielle dans les travaux publics - avril 2016 (Octobre 2016).

<http://www.insee.fr/fr/themes/info-rapide.asp?id=58&date=20160426>

Rapport FNTP de 2015. (Octobre 2016)

http://www.fntp.fr/upload/docs/application/pdf/2016-05/fntp_ra_2015_hdef_2015-11-25_12-51-5_95.pdf

Revue reflet et perspective de la vie économique de 2004. (Octobre 2016).

<https://www.cairn.info/revue-reflets-et-perspectives-de-la-vie-economique-2004-4-page-111.htm>

Installations d'éclairage extérieur Règles (Octobre 2016).

<http://courtd2.free.fr/pdf/NF%20C17-200%20-%20bis%20fr.pdf>

Fiches à destinations des maires sur l'éclairage public. (Octobre 2016).

http://www.afe-eclairage.com.fr/docs/2015/01/16/01-16-15-12-18-2015-Cahier_fiches_AFE_maire_eclairage_public.pdf

Recommandations pour l'utilisation de l'éclairage public en Val de Loire. (Novembre 2016).

<http://www.valdeloire.org/uploadfiles/publications/1166/recommandations2.pdf>

Norme et réglementations de l'installation de l'éclairage public. (Novembre 2016)

http://www.afe-eclairage.fr/docs/2014/12/09/12-09-14-11-27-normes_et_reglements_installation_eclairage_public.pdf

Puissance des lampadaires par étude de cas. (Novembre 2016).

http://www.thornlighting.fr/fr-fr/solutions/etudes-de-cas-par-projet/routes-et-tunnels/olivier-france/thorn_roadlighting-brochure_fr.pdf

Conversion Lux et Lumens. (Octobre 2016).

<http://www.econologie.com/eclairage-puissance-conseillee-lux-conversion-lumens/>

Quelle est la mobilité quotidienne des personnes dans les agglomérations ? (Octobre 2016).

http://lara.inist.fr/bitstream/handle/2332/891/CERTU_mobquotpers.pdf?sequence=4

La mobilité des Français. (Octobre 2016).

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rev3.pdf>

Transports : éléments caractéristiques et optimisation du plan de déplacements. (Novembre 2016).

<http://www.memoireonline.com/10/13/7568/Transports-et-deplacements-sur-Liguge--elements-caracteristiques-et-optimisation-du-plan-de.html>

Comment concevoir un chantier respectueux de l'environnement (choix des matériaux) ?

Etude de la piézoélectricité

Résumé :

L'environnement est un enjeu de plus en plus important et pris en compte par les entreprises de travaux public. En 2015, afin de marquer un fort engagement environnemental, Eurovia a mis au point un label "Excellence Environnement". Sur ses chantiers, Eurovia s'engage à mettre en place des actions pour de meilleures pratiques. L'un des principaux acteurs des chantiers de travaux publics est le conducteur de travaux. Il intervient et répond aux demandes de ses clients en établissant des propositions techniques nécessaires à toutes les étapes du chantier. Celui-ci peut alors, par le choix des matériaux, répondre aux contraintes écologiques et proposer des solutions respectueuses de l'environnement.

L'une des dernières innovations d'Eurovia en date, Lumi +, est un enrobé qui permet de réduire la consommation électrique liée à l'éclairage public de 30 à 40%. Lumi+ permet de réduire les consommations en électricité et les pollutions lumineuses. Pour aller plus loin dans ce sens, il faudrait que le conducteur de travaux puisse proposer une route qui combinerait les différents avantages de Lumi+ mais qui produirait l'électricité nécessaire pour couvrir les besoins de l'éclairage public et de la signalisation routière.

De plus en plus d'études ont pour objet la production piézoélectrique. Cependant aucune ne montre chiffres à l'appui les conditions nécessaires pour produire suffisamment d'électricité afin de couvrir l'ensemble des besoins électrique d'une infrastructure routière. La question suivante se pose alors : Bien que le flux automobile permette de produire de l'électricité, la piézoélectricité, accompagnée de l'innovation Lumi+, peut-elle produire suffisamment d'électricité pour couvrir les besoins des voiries, sans stockage de l'énergie ?

La première partie de ce rapport illustre le fait que le besoin électrique des infrastructures est très important, en définissant celui-ci, puis en le chiffrant. Par la suite, la deuxième partie, montre que le flux de véhicule ne permet qu'une faible production piézoélectrique. Et enfin, la dernière partie nous explique pourquoi la piézoélectricité n'est pas une bonne solution pour couvrir les besoins électriques des infrastructures routières, comme peut l'annoncer le bureau d'étude Innowatch, par la voix de la Dr Lucy Edery-Azulay.

Mots Clés :

Conducteur de travaux – Piézoélectricité – Voirie – Eclairage Public – Signalisation routière – Environnement – Eurovia – Orléans – 45 – Innovation – Lumi+