

Énergie pour les objets connectés : Compte-Rendu de TP



Sandra BEJAoui

Tom LASALLE

Florent MIRANVILLE

1. Introduction	3
2. Etude de la charge et du design	4
2.1. Implémentation en consommation directe	6
2.2. Implémentation en “store then use”	7
2.2.1. Calcul de la puissance minimale d’entrée requise	12
3. Caractérisation du redresseur	13
4. Choix de l’antenne	19
5. Transfert d’énergie électromagnétique rayonné	20
6. Conclusion générale	22
Sources	23

1. Introduction

La croissance rapide de l'Internet of Things (IoT) soulève de nouvelles problématiques, notamment liées à l'énergétique et à la mobilité des appareils. L'augmentation du nombre de nœuds et endpoints limite l'usage de solution filaires pour leur alimentation énergétique et rend la logistique autour du remplacement régulier de batteries difficiles. L'enjeu est donc de concevoir des systèmes communicants pouvant fonctionner en autonomie et sans-fil, avec des solutions permettant d'exploiter des sources d'énergies disponibles dans l'environnement, qui sont généralement perdues ou gâchées, et les convertir ou les stocker sous forme électrique.

Ce TP nous permet de nous approprier les concepts liés à l'alimentation énergétique des objets connectés, en particulier le principe de récupération d'énergie ambiante. Les principaux types d'énergie pouvant être récupérée et convertie en électricité sont l'énergie lumineuse, mécanique, thermique , électromagnétique. Nous nous intéresserons dans ce TP au transfert d'énergie issue d'un environnement électromagnétique afin d'alimenter un objet connecté de faible consommation, à savoir une LED.

Nous allons donc mettre en oeuvre cette approche expérimentale à l'aide d'un USRP(Universal Software Radio Peripheral) qui fera office de source d'énergie électromagnétique associé à des antennes telles que la log périodique de largeur de bande comprise entre 850 MHz et 6500 MHz, d'un capteur qui va analyser l'intensité d'une LED rouge SML-D12U1WT8.

2. Etude de la charge et du design

Nous cherchons dans un premier temps caractériser les besoins électriques de la LED rouge SML-D12U1WT8 qui servira de charge à notre système de récupération d'énergie électromagnétique. Avant de concevoir le circuit de récupération de puissance, il est nécessaire de déterminer la puissance continue nécessaire pour alimenter notre LED dans diverses conditions de fonctionnement. Nous calculons donc la puissance de fonctionnement pour une luminosité nominale, à 50 % et à 25%. Nous aurons ainsi une idée quantitative de l'énergie à récupérer nécessaire pour alimenter notre charge.

La puissance électrique consommée est donnée par :

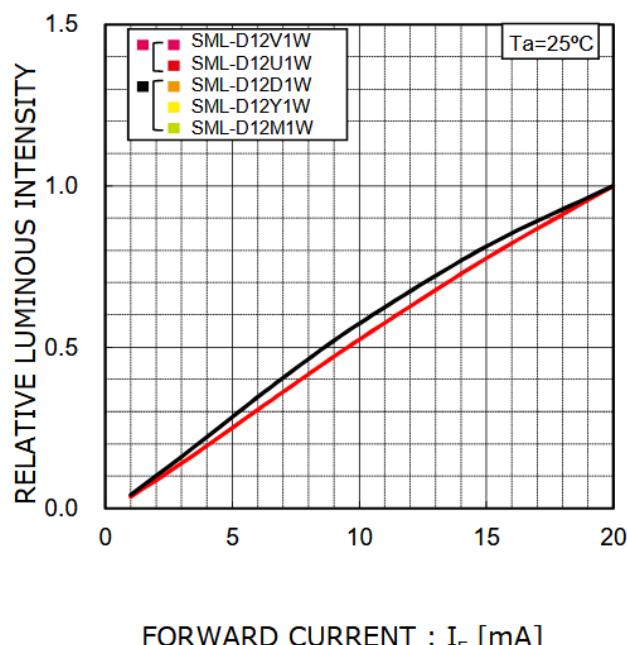
$$P = V_f \times I_f$$

Avec :

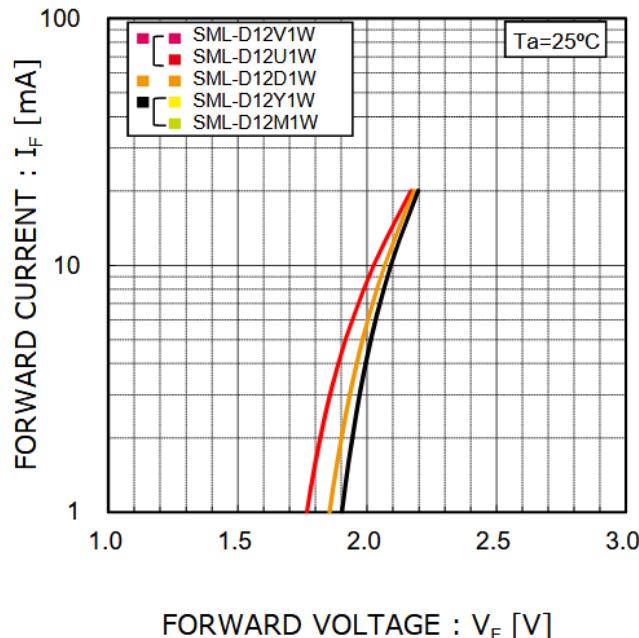
- P : la puissance consommée par la LED en watts (W)
- V_f : la tension de directe de la LED, en volts (V)
- I_f : le courant direct traversant la LED, en ampères (A).

La datasheet fournit plusieurs graphes, parmi eux :

- un premier représentant l'évolution de l'intensité lumineuse en fonction du courant direct ;



- le second illustre la variation de la tension directe V_f en fonction du courant I_f .



À partir de ces graphes, nous relevons approximativement, pour les différentes intensités lumineuses (100 %, 50 % et 25 %), les couples tension–courant correspondants. Ces valeurs nous permettent ensuite de déterminer les puissances consommées associées à chaque niveau d'intensité lumineuse.

Intensité lumineuse	Tension directe V_f [V]	Courant Direct I_f [mA]	Puissance consommée P [mW]
100%	2.2	20	44
50%	2	9.5	19
25%	1.9	5	9.5

Nous souhaitons tout d'abord mettre en œuvre une stratégie de « consommation directe », où l'énergie électromagnétique récupérée est utilisée immédiatement pour alimenter la LED.

A l'aide de la puissance électrique requise précédemment identifiée, nous pouvons désormais évaluer l'énergie nécessaire à son allumage pendant une durée définie. Cette nouvelle estimation permet d'identifier les quantités d'énergie à récupérer. Nous déterminerons ainsi ci-dessous l'énergie nécessaire pour alimenter la LED pendant une seconde, en fonction de sa consommation CC.

La puissance étant exprimée en watts (W), c'est-à-dire en joules par seconde (J/s), elle représente la quantité d'énergie consommée par unité de temps. Pour déterminer la consommation énergétique totale d'un dispositif sur une durée donnée, il suffit donc de multiplier la puissance par le temps de fonctionnement. L'énergie consommée par une LED peut ainsi être déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$E = P \times t$$

avec :

- E : énergie consommée (en joules, J)
- P : puissance électrique de la LED (en watts, W)
- t : temps de fonctionnement (en secondes, s)

2.1. Implémentation en consommation directe

Dans un premier temps, l'objectif est d'évaluer la faisabilité d'une stratégie de consommation directe, consistant à utiliser immédiatement l'énergie électromagnétique récupérée, sans recourir à un dispositif de stockage intermédiaire. Une telle approche permettrait l'alimentation de la LED tout en minimisant à la fois les coûts énergétiques et financiers associés au système de récupération.

Nous avons précédemment déterminé la puissance consommée (en watts) pour différentes valeurs d'intensité lumineuse. À partir de ces résultats, il est désormais possible de calculer l'énergie nécessaire pour une durée de fonctionnement d'une seconde.

Intensité lumineuse	Tension directe V_f [V]	Courant Direct I_f [mA]	Puissance consommée P [mW]	Energie consommée E [mJ]
100%	2.2	20	44	44
50%	2	9.5	19	19
25%	1.9	5	9.5	9.5

Nous avons dans un premier temps déterminé la puissance nécessaire au fonctionnement de la LED pour différents régimes de luminosité (nominal, 20 %, 50 %). Nous savons ainsi qu'une puissance de 44 mW sous 2,2 V est requise pour atteindre la luminosité nominale.

Cependant, il n'est pas possible de déterminer précisément la luminosité correspondante, car la documentation ne fournit que l'intensité lumineuse minimale (40 mcd) et typique (63 mcd), sans établir de relation directe entre la puissance électrique et la luminosité émise.

De plus, la datasheet ne permet pas d'encadrer clairement la puissance d'alimentation de la LED. On y lit qu'il est possible d'aller jusqu'à 54 mW, mais sans indication sur le couple tension/courant correspondant. De même, aucune puissance minimale n'est précisée. Pour avoir une idée on pourrait supposer qu'une puissance minimale correspondrait à une intensité lumineuse de 10 %, soit environ 2 mA sous 1,8 V, mais cela reste une estimation.

Pour obtenir une vision plus précise correspondant directement à la LED étudiée, il serait nécessaire de caractériser expérimentalement la LED, afin d'établir les couples tension/courant réels et de les associer à la luminosité mesurée.

La récupération d'énergie électromagnétique présente une forte variabilité, car elle dépend directement de l'environnement électromagnétique ambiant. D'après le cours, l'ordre de

grandeur de la densité d'énergie électromagnétique disponible varie généralement entre 80 $\text{pW}\cdot\text{cm}^{-3}$ et 100 $\text{nW}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Afin d'obtenir une estimation représentative, nous calculons le temps nécessaire pour accumuler l'énergie requise par la LED dans plusieurs scénarios : 80 pW, 100 nW, 1 μW et 1 mW.

Le temps d'accumulation est évalué à partir de la relation :

$$t = \frac{E}{P_{\text{harvest}}} [\text{s}]$$

où :

- t est le temps nécessaire (en secondes),
- E : l'énergie requise par la LED (en joules)
- P_{harvest} la puissance récupérée (en watts).

Il s'agit ici d'une estimation optimiste du temps requis, car les pertes énergétiques potentielles ne sont pas prises en compte.

Luminosité	Énergie requise (1 s)	Temps à 80pW	Temps à 100nW	Temps à 1 μW	Temps à 1mW
100% (44 mJ)	0,044 J	152778 h	122 h	12 h	44 s
50% (19 mJ)	0,019 J	65972 h	53 h	5 h	19 s
25% (9.5 mJ)	0,0095 J	32986 h	26 h	3 h	9.5 s

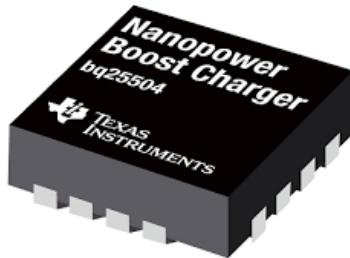
Allumer la LED 1 s en consommation directe à 44 mW est pratiquement impossible en RF ambiante, l'énergie instantanée disponible est généralement nW, donc plusieurs ordres de grandeur trop faible.

2.2. Implémentation en “store then use”

Nous envisageons désormais de mettre en œuvre la stratégie « store then use », qui consiste à stocker l'énergie récoltée dans un tampon énergétique (par exemple un supercondensateur) avant de l'utiliser pour alimenter la LED. Cette approche permet d'assurer une alimentation stable et continue de la charge, même lorsque la source d'énergie est intermittente ou de faible puissance.

Présentation du PMU bq25504

Pour garantir le bon fonctionnement de cette architecture, nous utiliserons une unité de gestion de l'alimentation (PMU), le bq25504 de Texas Instruments [3].



Le bq25504 est un composant spécialement conçu pour les applications à basse consommation et la récolte d'énergie. Il permet de capter efficacement des puissances comprises entre le microwatt (μW) et le milliwatt (mW) à partir de diverses sources continues.

Ce circuit intègre un convertisseur boost/chargeur DC-DC capable de démarrer à partir d'une tension d'entrée de seulement 600 mV. Une fois démarré, il peut poursuivre la récolte d'énergie même à partir de sources de très faible tension (jusqu'à 130 mV). Le bq25504 nécessite une puissance maximale de 16,62 μW lors du démarrage à froid et de 14,725 μW en régime de charge normal [3].

Ses seuils de tension sont les suivants :

- Tension de désactivation minimale : 2,2 V
- Tension d'activation maximale : 5,25 V

Présentation du TPS63031



Pour compléter le système de gestion de l'énergie, nous utilisons le convertisseur DC-DC buck-boost TPS63031, également de Texas Instruments. Ce composant permet de convertir et réguler la tension de sortie afin d'alimenter la LED de manière stable, quelles que soient les variations de la tension issue du supercondensateur. Le TPS63031 garantit ainsi un rendement élevé et une luminosité constante de la LED.

Sélection des supercondensateurs

Plusieurs modèles de supercondensateurs de différents fabricants ont été considérés :

Capacité	Fabricant	Pertes maximales
100 µF	Taiyo Yuden	26,25 nW
220 µF	Taiyo Yuden	26,25 nW
1,5 mF	Panasonic	413 µW
2,2 mF	Panasonic	606 µW
6,8 mF	AVX	52,5 µW
10 mF	AVX	289 µW
22 mF	AVX	26,25 µW

Nous avons précédemment déterminé qu'il fallait une puissance de 44 mJ pour une luminosité nominale, 19 mJ pour 50 % de la luminosité nominale et 9 mJ pour une 25 % de la luminosité nominale.

La tension spécifiée (par le PMU / DC-DC) minimale de désactivation est de 2,2 V et la tension maximale d'activation est de 5,25 V. Ainsi, il est possible de choisir une tension d'activation $V_{high} \leq 5.5$ et une tension de désactivation $V_{low} \geq 2.2$ V. Pour maximiser l'énergie disponible, nous choisissons $V_{high} = 5.5$ et $V_{low} = 2.2$ V.

Nous utilisons la formule :

$$E = \frac{1}{2} C (V_{high}^2 - V_{low}^2)$$

qui exprime l'énergie stockée dans un condensateur en fonction de sa capacité C et de la tension V à ses bornes.

Dimensionnement pour luminosité nominale (100 %) :

Pour obtenir la luminosité nominale, la LED nécessite une énergie de $E = 44$ mJ.

Nous cherchons alors la capacité minimale C telle que :

$$C \geq \frac{2 * E}{(V_{high}^2 - V_{low}^2)}$$

En prenant $V_{high}=5.25$ V et $V_{low} = 2.2$ V, on obtient :

$$C \geq \frac{2 * 44 * 10^{-3}}{(5.25^2 - 2.2^2)} = 3.47 \text{ mF}$$

Il faut donc une capacité théorique minimale de 3.9 mF pour garantir l'allumage à luminosité nominale pendant 1 seconde.

Ainsi, seuls les supercondensateurs du fabricant AVX (6.8 mF, 10 mF et 22 mF) sont viables, car les valeurs inférieures ne permettent pas de stocker suffisamment d'énergie.

Une fois cette condition vérifiée, on peut déterminer la tension maximale réelle $V_{high,réel}$ atteinte pour chaque capacité réelle à partir de :

$$V_{high,réel} = \sqrt{\frac{2E}{C_{réel}} + V_{low}^2}$$

Cette tension correspond à la valeur minimale de V_{high} requise, compte tenu de la capacité choisie.

On peut également calculer :

- l'énergie maximale stockable par le système entre les seuils du PMU/DC-DC :

$$E_{max} = \frac{1}{2} C (V_{high}^2 - V_{low}^2)$$

avec $V_{high} = 5.25 \text{ V}$ et $V_{low} = 2.2 \text{ V}$,

- et l'énergie effectivement stockée dans le scénario réel, dépendant du condensateur choisi :

$$E_{réel} = \frac{1}{2} C (V_{high}^2 - V_{low}^2)$$

Ces deux valeurs permettent de comparer la capacité théorique maximale du système et l'énergie effectivement disponible selon la capacité réelle utilisée.

Comparatif des condensateurs viable disponibles :

Capacité	Fabricant	Pertes maximales	Energie maximale disponible [mJ]	Vmax Réel [V]	Energie disponible réelle [mJ]
6,8 mF	AVX	52,5 µW	77.26	4.22	79.38
10 mF	AVX	289 µW	113.61	3.69	119.35
22 mF	AVX	26,25 µW	249.95	2.97	270.48

Calcul pour la luminosité à 50% :

Pour une luminosité de 50 %, la LED nécessite une énergie de $E = 19$ mJ. La capacité théorique minimale du condensateur est donnée par :

$$C \geq \frac{2E}{(V_{high}^2 - V_{low}^2)}$$

En remplaçant les valeurs :

$$C \geq \frac{2 * 19 * 10^{-3}}{(5.25^2 - 2.2^2)} = 1.67 \text{ mF}$$

Nous pouvons donc choisir cette fois-ci un condensateur Panasonic de 2,2 mF, dont la valeur est supérieure à la capacité minimale requise.

Comparatif des condensateurs viable disponibles :

Capacité	Fabricant	Pertes maximales	Energie maximale disponible [mJ]	Vmax Réel [V]	Energie disponible réelle [mJ]
2,2 mF	Panasonic	606 µW	24.99	4.70	25.15
6,8 mF	AVX	52,5 µW	77.26	3.23	82.73
10 mF	AVX	289 µW	113.61	2.94	123.12
22 mF	AVX	26,25 µW	249.95	2.56	274.10

Calcul pour la luminosité à 25% :

Pour une luminosité de 25 %, la LED nécessite une énergie de $E = 9$ mJ. La capacité théorique minimale du condensateur est donnée par :

$$C \geq \frac{2E}{(V_{high}^2 - V_{low}^2)}$$

En remplaçant les valeurs :

$$C \geq \frac{2 * 9 * 10^{-3}}{(5.25^2 - 2.2^2)} = 792.17 \mu\text{F}$$

Nous pouvons donc choisir cette fois-ci un condensateur Panasonic de 1.5 mF, dont la valeur est supérieure à la capacité minimale requise.

Comparatif des condensateurs viable disponibles :

Capacité	Fabricant	Pertes maximales	Energie maximale disponible [mJ]	Vmax Réel [V]	Energie disponible réelle [mJ]
1,5 mF	Panasonic	413 µW	17.04188	4.103657	17.59413
2,2 mF	Panasonic	606 µW	24.99475	3.608576	26.34932
6,8 mF	AVX	52,5 µW	77.2565	2.736249	84.40925
10 mF	AVX	289 µW	113.6125	2.57682	124.9284
22 mF	AVX	26,25 µW	249.9475	2.378693	277.0219

2.2.1. Calcul de la puissance minimale d'entrée requise

On souhaite désormais déterminer la puissance d'entrée continue minimale nécessaire pour assurer le fonctionnement stable du système. Afin de connaître la puissance minimale que la source d'alimentation doit fournir pour que le système reste opérationnel.

Pour que le système tienne la charge et compense les pertes statiques il faut au minimum :

$$P_{in,min} \geq P_{PMU/DC} + P_{fuite}$$

Le système nécessite une puissance maximale de 16,62 µW lors du démarrage à froid et de 14,725 µW pendant la charge normale.

On peut ainsi calculer pour chaque capacités en démarrage à froid et pendant la charge normale :

Capacité	Fabricant	Pertes maximales	Démarrage à froid [W]	Charge normale [W]
100 µF	Taiyo Yuden	26,25 nW	1.66E-05	1.48E-05
220 µF	Taiyo Yuden	26,25 nW	1.66E-05	1.48E-05
1,5 mF	Panasonic	413 µW	4.30E-04	4.28E-04
2,2 mF	Panasonic	606 µW	6.23E-04	6.21E-04
6,8 mF	AVX	52,5 µW	6.91E-05	6.72E-05

10 mF	AVX	289 µW	3.06E-04	3.04E-04
22 mF	AVX	26,25 µW	4.29E-05	4.10E-05

Les pertes d'énergie dans les supercondensateurs ne dépendent pas uniquement de leur capacité, mais aussi de la technologie utilisée. En effet, les petits supercondensateurs (par exemple ceux de 100 µF à 2.2 mF) reposent souvent sur une technologie électrochimique. Ces dispositifs présentent généralement des pertes plus grandes. À l'inverse, les grands supercondensateurs (comme ceux de 6.8 mF, 10 mF ou 22 mF du fabricant AVX) utilisent souvent des technologies électrostatiques. Ils permettent généralement de mieux conserver l'énergie et donc réduire les pertes.

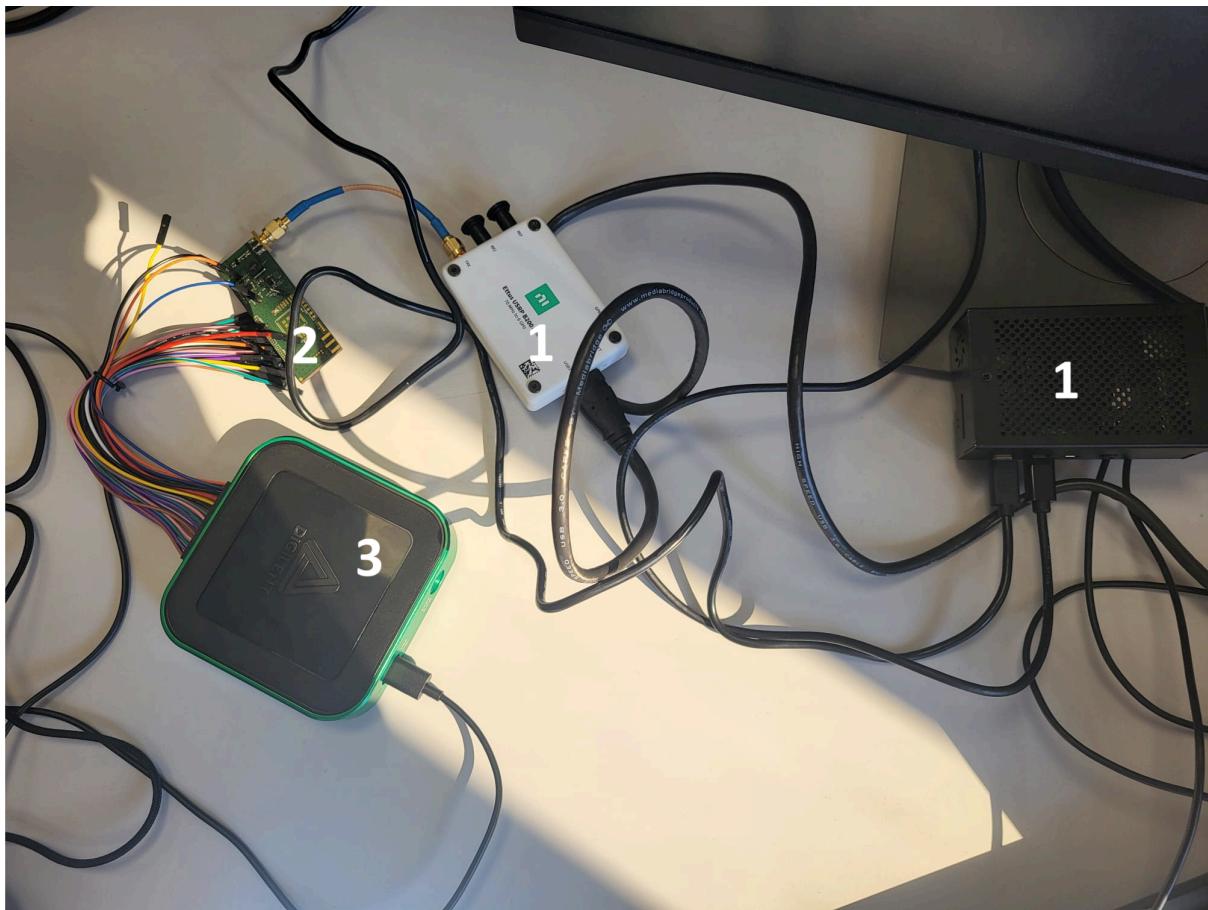
Ainsi, augmenter la capacité n'entraîne pas forcément une hausse des pertes : cela dépend fortement de la technologie employée. C'est pourquoi il peut être avantageux de conserver un supercondensateur de grande capacité.

En revanche, une grande capacité implique une plage d'énergie "non utilisable" plus importante : la portion d'énergie restant entre V_{low} et 0 V n'est jamais exploitée. Plus la capacité est grande, plus cette énergie "morte" augmente.

3. Caractérisation du redresseur

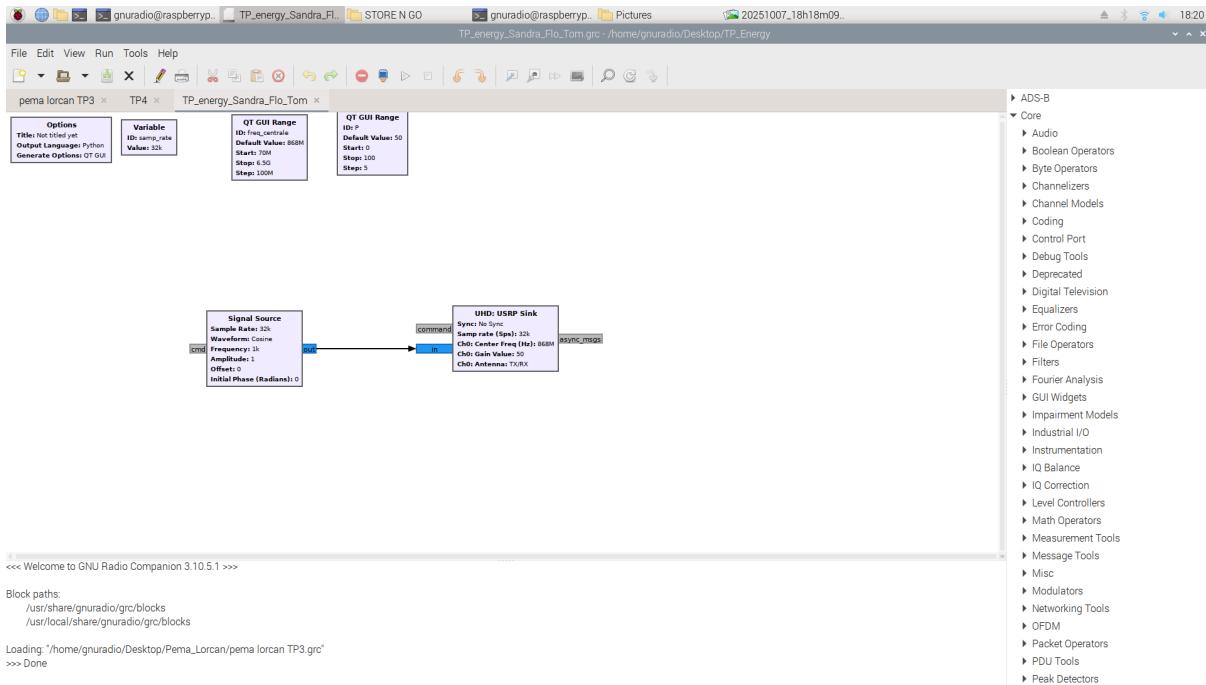
Nous allons utiliser un redresseur pour convertir la fréquence captée par l'antenne en une tension qui sera exploitée par la LED. Pour caractériser son comportement, nous allons réaliser une expérimentation avec le montage suivant :

- une source de puissance en utilisant un USRP (Universal Software Radio Peripheral) et le logiciel GNURadio installé sur un Raspberry Pi (1)
- la LED SML-D12U1WT8 montée sur un circuit imprimé (2)
- un appareil de mesure de tensions continues en sortie en utilisant un Analog Discovery (3)



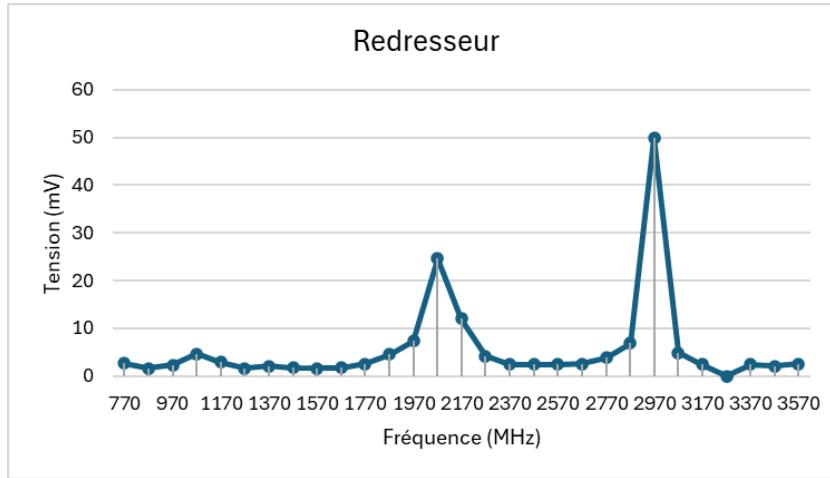
Montage de l'expérimentation

Nous commençons d'abord à faire le montage GNURadio pour l'expérimentation, qui sera composé de 3 blocs de variables à savoir une fréquence d'échantillonnage, un bloc range pour choisir la fréquence émise allant de 70 MHz à 6.5 GHz, et second bloc range pour choisir la puissance de la LED en pourcentage. Le montage comprend 2 blocs actifs, à savoir le Signal Source qui est simplement un signal continu, et un bloc USRP Sink qui va émettre le signal en continu.



Partie GNURadio du montage

Pour analyser la tension récupérée, nous utilisons le logiciel Waveforms qui va détecter automatiquement l'Analog Discovery et récupérer les mesures. L'objectif est donc d'observer le comportement de l'amplitude de la tension en faisant varier la fréquence centrale en entrée, et ainsi repérer à quelles fréquences le redresseur fonctionne le mieux, c'est-à-dire pour quelles fréquences il produit la tension maximale. On suppose que ces mesures sont faites avec une résistance de charge égale à 1,5 kΩ et un niveau RF d'entrée de -15 dbm.



Courbe de la tension en fonction de la fréquence émise pour une intensité à 100%

Nous pouvons voir sur les mesures que deux pics se démarquent, nous avons obtenu une tension maximale $T_{max} \approx 50$ mV pour une fréquence de 2,97 GHz. Calculons donc la puissance de sortie du redresseur avec la loi de Joule :

$$P = \frac{U^2}{R}$$

avec :

- la puissance P_{DCout} en W
- La tension en sortie U en V et $U = 50 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
- la résistance de charge R en Ω et $R = 1,5 \cdot 10^3 \Omega$

On obtient $P = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ W}$ soit $P = 1,67 \mu\text{W}$

Cela représente la quantité d'énergie qui a été convertie depuis le niveau de puissance RF d'entrée. Convertissons maintenant ce niveau RF P_{Rfin} en W et calculons ensuite le rendement de la conversion dont la formule est :

$$\eta_{rectifier} = \frac{P_{DC_out}}{P_{Rf_in}}$$

avec :

- $\eta_{rectifier}$ le pourcentage de rendement
- P_{DCout} la puissance en sortie soit $1,67 \mu\text{W}$
- P_{Rfin} la puissance d'entrée en W

Calculons P_{Rfin} avec la formule suivante en rappelant que la puissance RF d'entrée est de -15 dBm :

$$P(W) = 1W \times \frac{10^{\frac{P(\text{dBm})}{10}}}{1000} = 10^{\frac{P(\text{dBm})-30}{10}}$$

https://fr.farnell.com/calculateur-de-conversion-dbm-en-watts?srsltid=AfmBOopeDJq96PJw5QNuYn0JLKz18xUy_dSO6eaZ5eT-d-NOlo6zaR7-

On obtient $P_{Rfin} = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ W}$, soit $P_{Rfin} = 31.6 \mu\text{W}$

Nous pouvons maintenant calculer le rendement :

$$\eta_{rectifier} = \frac{1,67}{31.6} \simeq 5.2\%$$

Cela signifie donc que sur la puissance RF en entrée, seulement 5.2% est convertie en énergie exploitable.

Nous pouvons calculer une estimation de la valeur minimale de puissance en entrée nécessaire pour le bon fonctionnement de la LED en DC, de façon optimiste car les pertes sont négligées. Un bon fonctionnement signifie que la LED s'allume à l'intensité désignée. Comme indiqué dans les parties précédentes, la LED a besoin d'une puissance de sortie P_{DCout} d'au moins 44 mW pour fonctionner à une luminosité de 100%. Nous voulons donc

trouver P_{Rfin} respectant cette contrainte en prenant en compte le rendement $\eta_{rectifier}$ calculé.

Nous posons donc l'équation suivante :

$$P_{Rfin} = \frac{P_{DCout}}{\eta_{rectifier}}$$

avec :

- $\eta_{rectifier} = 5,2 \cdot 10^{-2}$
- $P_{DCout} = 44 \text{ mW}$

On obtient $P_{Rfin} = 880 \text{ mW}$; soit +29 dbm en convertissant.

Si l'on prend par exemple l'étude de cas "[Comparison of ambient radiofrequency electromagnetic field \(RF-EMF\) levels in outdoor areas and public transport in Switzerland in 2014 and 2021](#)" , les niveaux de puissance des ondes RF dans les milieux urbains et ruraux sont généralement très basses, de l'ordre du μW . Cela renforce l'idée qu'une alimentation directe de la LED est difficile voire impossible. Il faudrait donc utiliser la méthode "store and use" pour plutôt stocker l'énergie dans un supercondensateur au fur et à mesure pour pouvoir l'utiliser ensuite. Nous allons calculer le temps de recharge selon des puissances RF d'entrée comprises dans l'intervalle [-15;+15] et nous allons choisir un condensateur avec une capacité à 6.8 mF pour cette expérimentation.

Le temps nécessaire à la recharge est calculé selon la formule de la partie précédente :

$$t = \frac{E}{P_{DCout}}$$

avec :

- t est le temps nécessaire en secondes
- E : l'énergie maximale disponible du condensateur en J. Pour un condensateur avec une capacité à 6.8 mF, $E = 77,3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
- P_{DCout} la puissance en sortie en W , avec $P_{DCout} = (P_{Rfin} \cdot \eta_{rectifier}) - L_{max}$.

L_{max} La perte maximale du condensateur 6.8 mF vaut $52,5 \mu\text{W}$. $\eta_{rectifier}$ le rendement du redresseur vaut 5.2%

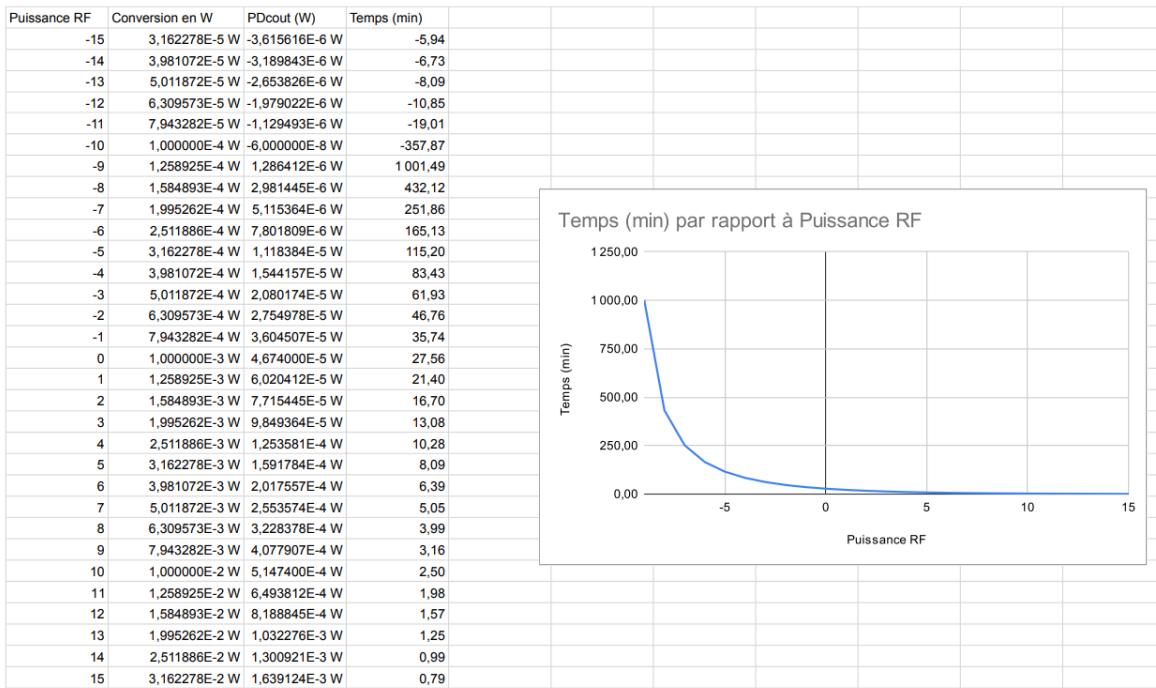


Tableau et courbe du temps de recharge (minutes) en fonction de la puissance RF d'entrée

On retire les mesures des puissances RF de -15 dbm à -10 dBm car à cause des pertes il n'est pas possible de recharger le condensateur, on a donc un seuil de recharge minimum à -9 dBm. Le temps a été affiché en minutes pour une meilleure lisibilité, et il diminue rapidement dès lors qu'on quitte le seuil de recharge minimum.

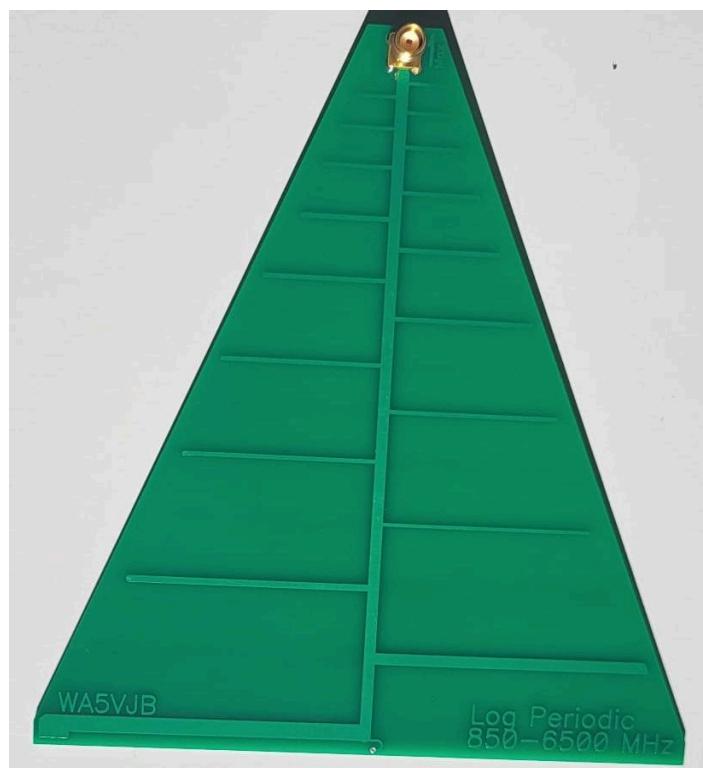
Nous aurions voulu faire des mesures pour une luminosité à 50% afin de mieux comprendre le comportement du redresseur à niveau nettement plus faible de puissance, mais nous n'avons pas eu le temps de les faire correctement à cause de divers problèmes.

4. Choix de l'antenne

Maintenant que nous avons mesuré les valeurs pour une récupération idéale de la tension, nous allons nous pencher sur le choix de l'antenne qui va nous permettre de collecter les fréquences ambiantes efficacement. Nous avons à disposition plusieurs types d'antennes :



Antenne Log périodique 400-1000 MHz



Antenne directionnelle WA5VJB Log périodique 850-6500 MHz

Pour notre application de récupération d'énergie électromagnétique ambiante, nous avons choisi une antenne log-périodique qui couvre une large bande de fréquence allant de 850 MHz à 6,5 GHz. Mais d'abord, qu'est ce qu'une antenne log périodique ?

Une antenne log-périodique est une antenne large bande, dont les éléments ont des longueurs et espacements croissants de manière logarithmique, ce qui permet de maintenir un gain et une impédance relativement stables sur toute la bande ; dans notre contexte, elle capte efficacement l'énergie RF ambiante provenant de différentes sources (GSM, Wi-Fi, TV...) et maximise la puissance reçue par le redresseur. [1]

De plus avec les mesures réalisées avec notre montage, nous avons observé que notre redresseur présentait des pics de tension maximale autour de 2.97 GHz et 2.07 GHz. La bande de l'antenne WA5VJB inclut ces pics et nous permet d'être sûr que le signal reçu pourra être converti en énergie exploitable par notre redresseur.

5. Transfert d'énergie électromagnétique rayonné

L'objectif de cette partie était d'estimer la portée maximale à laquelle il serait possible d'alimenter notre redresseur et la LED à l'aide d'un transfert d'énergie électromagnétique sans fil ou WPT (Wireless Power Transfer). Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les équations données dans l'énoncé du TP ainsi que sur les valeurs expérimentales obtenues lors de la caractérisation du redresseur.

La puissance transmise par l'émetteur est limitée par les contraintes réglementaires à +33 dBm (soit environ 2 W) à 868 MHz et à 27 dBm (0.501 W) à 2.45 GHz.

Dans notre cas, la fréquence ciblée pour notre redresseur est de 2.97 GHz, c'est à cette fréquence qu'on convertit le mieux l'énergie. On va donc se baser sur le cas qui se rapproche le plus de notre fréquence, à la bande ISM 2.45 GHz.

Nous cherchons la distance maximale d_{max} telle que la puissance DC disponible $P_{DC,out}$ soit égale à la puissance demandée par la LED PLED.

Pour la déterminer, nous utilisons la relation liant la puissance reçue à la distance entre l'émetteur et la rectenna, notre PCB de test, qu'on a déduite à partir des expressions fournies.

Pour :

- $P_{DC,out}$: puissance continue fournie à la LED
- $PRF-in$: puissance RF reçue à l'entrée du redresseur
- S : densité de puissance incidente

- A_{eff} : aire effective de l'antenne

En partant de :

$$P_{RF_in} = S * A_{eff}$$

et

Incident electromagnetic power density

$$S = \frac{E^2}{120 \cdot \pi} (W \cdot m^{-2})$$

Effective area of the antenna

$$A_{eff} = G_{RX} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} (m^2)$$

On remplace le champ électrique E par son expression en fonction de la puissance émise et du gain des antennes :

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{TX} \cdot G_{TX}}}{d} (V \cdot m^{-1})$$

Ce qui nous donne :¹

$$P_{ref-in} = \frac{30 P_T G_T}{d^2} \cdot \frac{1}{120\pi} \cdot \frac{G_R \lambda^2}{4\pi}$$

et en regroupant les constantes, on obtient :

$$P_{ref-in} = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

A partir de cette formule qui est d'ailleurs assimilable à l'équation de Friis qui nous permet de calculer le bilan de propagation en espace libre, on peut isoler la distance d :

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T G_T G_R}{P_{ref-in}}}$$

Et on peut alors estimer la distance maximale qui nous permet de fournir une puissance suffisante à la charge, ici notre LED. Toutefois, pour calculer la portée "rigoureusement" il faudrait calculer la perte de trajet, qui inclut la pénétration, la réflexion et la diffraction, c'est-à-dire comment les ondes radio interagissent avec les obstacles (arbres, bâtiments, sol). Il existe des outils comme le CST Microwave Studio.

¹ L'utilisation de la notation "ref" résulte d'une erreur de frappe, la notation correcte aurait dû être P_{RF_in} .

Nous allons faire une estimation tout de même pour avoir un ordre de grandeur en partant du principe que la zone entre les deux antennes est complètement dégagée.

En prenant :

- PRFin = 880 mW qu'on a calculé dans la caractérisation
- GT = GR = 6 dBi (basé sur la datasheet de l'antenne qu'on a choisie, et une estimation qu'on a un gain similaire en réception et en transmission) qu'on transpose en facteur linéaire à l'aide de la formule $G(dBi) = 10\log(G)$, on récupère $G = 10^{(6)/10}$ qui vaut approximativement 3,981.
- λ calculé sur la base de la bande ISM 2.45 GHz, on a $\lambda = c/f = 0,1224$ m

On obtient alors, $d = 2.9$ cm qui correspond à la portée maximale théorique pour que la LED reçoive 880 mW avec le rendement mesuré qui est de 5.2 %. Il faut bien garder en tête qu'il s'agit du résultat en espace libre, sans obstacles, ni pertes supplémentaires. Il faudrait s'attendre à une distance inférieure.

On voit dans l'équation que la portée est proportionnelle à la longueur d'onde, donc inversement proportionnelle à la fréquence de fonctionnement optimale. Ainsi, quand la fréquence augmente, la portée maximale est réduite pour une même puissance émise et des gains d'antenne identiques.

Pour augmenter la portée, on pourrait choisir une antenne avec un gain plus élevé, ou réduire la consommation de charge en utilisant une LED ultra basse consommation par exemple.

6. Conclusion générale

Difficultés rencontrés

Tout d'abord, nous avons rencontré quelques soucis dans l'exécution des mesures sur le montage pour caractériser le redresseur, ce qui nous a pris beaucoup de temps sur la finalisation du TP. La première difficulté a été au niveau du logiciel Waveforms et à sa capacité à détecter automatiquement un Analog Discovery branché au système. En effet, notre Analog Discovery n'était pas détectable par le logiciel car nous avons utilisé en premier lieu un câble USB-C ne faisant que de la recharge d'appareil, or il fallait utiliser un câble USB-C permettant également le transfert de données pour qu'il soit repérable. Après avoir réglé ce souci, nous avons rencontré le second problème lorsque nous avons essayé de faire varier la fréquence et la puissance à des valeurs élevées (notamment 1 GHz pour une puissance de 70 dB) en ayant donc GNURadio et Waveforms en marche simultanément. Cela résultait en un dysfonctionnement (crash) des deux logiciels, où la seule issue pour les rouvrir était de redémarrer le Raspberry PI. Ce problème est dû à une alimentation insuffisante du Raspberry qui ne supportait donc pas les deux logiciels simultanément. La seule solution trouvée était d'ouvrir le logiciel Waveforms avant de lancer le programme sur GNURadio.

Conclusion

A partir de ce TP nous a permis de mieux comprendre différents aspects du cours sur l'énergie pour les objets connectés, à savoir la récupération d'énergie ambiante à un niveau électromagnétique, le transfert de cette énergie de manière sans-fil pour un système où l'alimentation est en continue ou sur un modèle "store and use". Cependant, à cause des difficultés citées ci-dessus, nous n'avions pas eu l'occasion de finir proprement le TP dans son intégralité, ce qui est dommage.

Sources

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
<https://mrce.in/ebooks/Antenna%20Theory%20Analysis%20&%20Design%204th%20Ed.pdf>
- [2] *BQ25504 ultra low-power boost converter with battery management for energy harvester applications*. (2023, août). TI.com. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>
- [3] *TPS6303x high efficiency single inductor buck-boost converter with 1-A switches*. (2020, avril). TI.com. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63030.pdf>