



MASTER 2 EEA ESET Spécialité ICEM

Mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil autonome en énergie.

Stage de fin d'étude de avril à septembre réalisé par
Pascal Tajan

Table des matières

Table des illustrations.....	iii
Introduction.....	1
1. Présentation des résultats des stages précédents :.....	2
2. Présentation des topologies réseau	3
2.1. Différence entre les modes de transmission de données	3
2.2. Quelles sont les topologies existantes	3
2.3. Avantages et inconvénients	4
3. Points essentiels pour la consommation	5
3.1. Compositions des modules	5
3.2. Fonctionnement du Jennic.....	5
3.3. Analyse consommation routeurs	7
3.4. Analyse consommation des Ends Devices.....	7
3.4.1. Beacon	7
3.4.2. Perte de réseau.....	8
3.4.3. Envoi des données	8
3.4.4. Mode sleep	8
3.4.5. Autres points à considérer	8
3.5. Choix des capteurs.....	9
4. Données et Dimensionnement.....	10
4.1. Données récupérées grâce aux ED par le coordinateur	10
4.1.1. Capteurs de temperature	11
4.1.2. Capteur d'humidité.....	12
4.1.3. Mesure de l'irradiance	13
4.2. Exploitation des données récupérées	13
4.2.1. Récupération d'énergie	13
4.2.2. Données des capteurs.....	15
4.3. Outils utilisé pour effectuer les mesures	18
4.4. Prix.....	19
4.4.1. Prix de notre installation.....	19

4.4.2. Prix du commerce	19
DISCUSSION	20
CONCLUSION	21
Référence bibliographique	22
ANNEXE	a
A. Photo du « sandwich » et des différentes cartes utilisée	a
B. Tableau récapitulatif des points communs et des différences des deux Jennic	a
C. Caractérisation du convertisseur analogique numérique	b
D. Partie programmable par l'utilisateur	b
E. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant l'envoi d'un beacon	e
F. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant la recherche du réseau	e
G. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant l'acquisition/envoi d'une donnée.....	f
H. Screenshot du fichier permettant le dimensionnement des récupérateurs d'énergie	g
I. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant un cycle entier	h
J. Screenshot d'une partie de la datasheet du Jennic	h
K. Caractérisation du pyranomètre	i
L. MPP des deux récupérateurs d'énergies	i
M. Photo du placement du TEG	j
N. Récupération des données du capteur d'humidité d'une journée ensoleillée	j
O. Tension de sortie du capteur de vibration (en bas) et sortie du monostable (en haut)	k
P. Diagramme de flux du programme de récupération de la vibration d'un moteur	l
Q. Explication du programme de récupération de la vibration d'un moteur	l
R. Outils de mesure	m
S. Prix des composants utilisés dans le stage	n

Table des illustrations

Figure 1 : principales topologies existantes.....	3
Figure 2 : réseau maillé dans le cas d'une défaillance d'un ED	4
Figure 3 : schéma des trois parties d'un module	5
Figure 4 : photo d'une carte Jennic avec une antenne externe.....	6
Figure 5 : Diagramme de flux de la partie récupération des données.	6
Figure 6 : Tension de sortie de trois capteurs analogiques (courbes du bas) suite à la mise sous tension du module (courbes du haut)	9
Figure 7 : Carte mesure réalisée.....	11
Figure 8 : branchement du capteur de température LM35.....	11
Figure 9 : Extrait du datasheet du LMT86.....	12
Figure 10 : Screenshot du datasheet du HIH-5030	12
Figure 11 : tension d'un ED (courbe du haut) avec une récupération d'énergie solaire et l'irradiance associée (courbe du bas)	14
Figure 12 : tension aux bornes d'un ED avec récupération d'énergie thermique	15
Figure 13 : Tension d'un ED sans récupération d'énergie.....	15
Figure 14 : température interne et externe d'une ruche	16
Figure 15 : humidité interne et externe d'une ruche	17
Figure 16 : Temps de vibration du capteur de vibration en fonction de la journée	17
Figure 17 : Photo d'un ED dans la boîte verte pendant l'expérience.....	20
Tableau 1 : Standards de communications.....	3
Tableau 2 : récapitulatif des types de données récupérées avec leur méthode de récupération associé..	10

Introduction

Les installations de méthanisation à la ferme ont le vent en poupe. L'optimisation des procédés physico chimique sur ces installations reste à améliorer. Pour cela, des mesures diverses sont nécessaires.

Or les chercheurs manquent de données expérimentales sur ces systèmes. D'où l'intérêt de mettre en place un système de collectes de mesures, performant, peu coûteux et aisément déployable à l'échelle d'une installation agricole. C'est cet objectif qui a motivé les travaux en cours.

Ce stage fait suite à d'autres travaux réalisés précédemment. Les réseaux de capteurs sans fil permettent de s'affranchir de toutes les contraintes liées à la connexion des modules à un réseau électrique, ce qui convient particulièrement dans le cas d'une ferme où l'environnement ne se prête pas à tirer les câbles.

Cependant les études dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil sont effectuées séparément les unes par rapport aux autres. En effet les domaines tels que l'aspect réseau, récupération d'énergie ou la consommation sont des axes de recherche mais il n'y a pas de mise en commun pour valider le bon fonctionnement de l'ensemble. Il y a donc un changement important quand on veut réaliser un projet complet regroupant tous les domaines cités. Ce stage s'inscrit dans la logique de regrouper tous les domaines liés aux réseaux de capteurs sans fil, ce qui explique son côté très « ingénierie ».

Durant ce stage je me suis attardé sur l'aspect énergétique d'un réseau de capteurs sans fils afin d'en comprendre le mécanisme et de pouvoir cibler les points critique vis-à-vis de la consommation. Pour ce faire l'application au biogaz nous a permis une sélection de capteurs appropriée pour cette application.

Cette démarche pourrait permettre aux personnes non initiées aux réseaux de capteurs sans fil de pouvoir créer son propre réseau. Le but est donc d'avoir un système fonctionnel applicable à d'autre domaine que le biogaz et avoir un prix raisonnable.

Dans un premier temps nous ferons une brève présentation des différents travaux déjà effectués par des stages précédents. Nous allons ensuite détailler et présenter les topologies réseaux existantes. Puis nous nous concentrerons sur les points essentiels liés à la consommation des modules du réseau de capteurs. Enfin nous reviendront sur une expérience significative qui illustre les données récupérées pour terminer avec le cout approximatif du dispositif utilisé.

1. Présentation des résultats des stages précédents :

Les stages précédents ont commencé en 2011 avec 4 étudiants de l'INSA. Ils avaient pour but de sélectionner un microcontrôleur afin de mettre en place un réseau de capteurs sans fil. Pour cela ils ont choisi le Jennic et la disposition du réseau en arbre. Les avantages et les inconvénients de ce type de réseau seront explicités dans le paragraphe suivant.

A partir de programme types (template), ils ont pu mettre en place la partie programmation qui gère la mise en réseau des différents modules ainsi que la fonction sleep qui permet de mettre le microcontrôleur dans un mode où la consommation est au minimum.

En 2013 l'objectif était de diminuer la consommation du Jennic car les résultats expérimentaux des étudiants précédents n'étaient pas conformes à la datasheet du Jennic. La principale amélioration fut de baisser la tension d'entrée du Jennic avec un régulateur qui avait un très bon rendement en entrée du microcontrôleur pour avoir le moins de perte énergétique possible entre la partie stockage d'énergie et le Jennic. Cette même année l'aspect récupération d'énergie est évoquée mais pas testée. Un programme labview est réalisé pour pouvoir récupérer les données du coordinateur et les stocker dans un fichier afin d'être exploitées. La mise en réseau grâce au logiciel dropbox permet de pouvoir traiter les données depuis un autre endroit que le lieu de mise en place du réseau. Suite à ces stages la consommation minimale conforme au datasheet est atteinte en plus de la récupération des données par le coordinateur. Seule une récupération d'un capteur de température était active.

En 2014 la sélection des capteurs permettant une application dans le biogaz est un des objectifs. Le choix des capteurs est donc réalisé et une carte regroupant tous les capteurs est confectionnée. Cependant des problèmes de consommation excessive sont détectés sur cette carte quand le microcontrôleur est en mode sleep.

En 2015 le dernier stage en date est focalisé sur la partie récupération d'énergie. Les deux modes de récupérations envisagés sont le solaire et la thermo électricité. Le problème de la consommation en mode sleep est théoriquement réglé en mettant un interrupteur commandé (load switch) en entrée de la carte de mesure mais pas expérimenté. La mise en place sur le site de la ville de Vic -Fesenzac est alors réalisée mais les résultats montrent des problèmes de consommation liés à un défaut de programmation qui sera corrigé en début de mon stage.

2. Présentation des topologies réseau

2.1. Différence entre les modes de transmission de données

Caractéristiques	Wifi	Bluetooth	ZigBee
IEEE	802.11b	802.15.1	802.15.4
Complexité	Très Grande	Grande	Faible
Durée de vie	Heures	Jours	Années
Nombre de noeuds	32	7	65000
Débit	11Mbits/s	1Mbits/s	20 - 250Kbits/s
Portée	100m	10m	10 - 300m

Tableau 1 : Standards de communications

Le débit ne nous important pas, et la consommation étant étroitement liée avec le débit, le standard de communication IEEE 802.15.4 (Tableau 1) a été choisi. Pour une question de facilité de programmation (structure de programme déjà fourni avec gestion de la couche réseau), le protocole « JenNet » est choisi. Il est une amélioration du protocole ZigBee. Il permet de gérer les aspects réseaux et communications plus facilement que le protocole ZigBee et offre une intégrité des données plus importante que le protocole ZigBee. De plus il gère aussi l'envoi des données pour éviter les collisions radio et donc les pertes de données. Enfin, il permet l'émission de « ack » (accusé de réception) pour vérifier la bonne réception des données. Avant d'envoyer une donnée à travers le réseau le module émetteur sonde le réseau pour savoir s'il est occupé ou s'il peut envoyer les informations.

2.2. Quelles sont les topologies existantes

Dans les WSN (Wireless Sensor Network) les trois topologies principales (Figure 1) sont la topologie en étoile (star), maillée (mesh) et en arbre (tree). Dans chacune des topologies il y a trois types de modules possibles :

Un coordinateur, des routeurs et des ED (End devices). Le coordinateur permet la collecte des données émises par les ED. Les routeurs permettent de faire le relais des informations entre les ED et le coordinateur. Les ED permettent la collecte des différents capteurs et transmettent l'information aux routeurs ou au coordinateur.

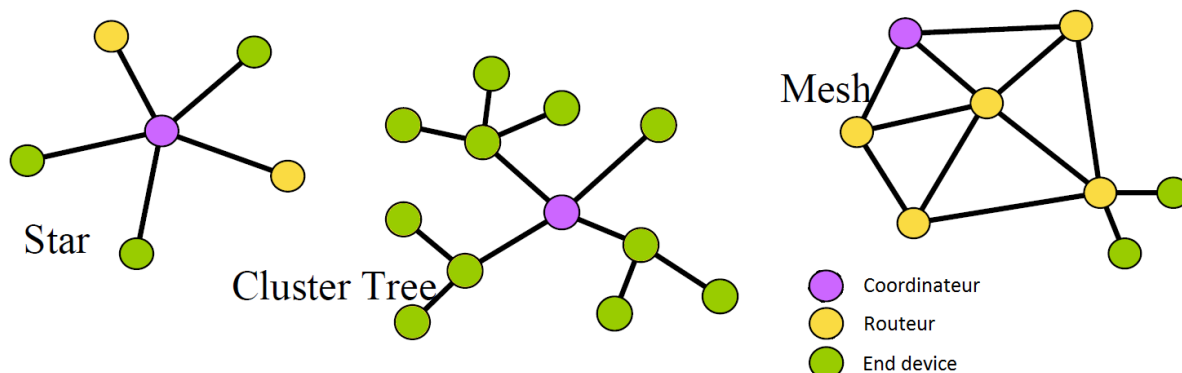


Figure 1 : principales topologies existantes

2.3. Avantages et inconvénients

Réseau en étoile : L'avantage du réseau en étoile est qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un réseau entre les ED car ils ne communiquent pas les uns avec les autres. Ils n'envoient des informations qu'au coordinateur.

L'inconvénient majeur et qui en découle est le fait qu'on ne puisse pas éloigner les ED du coordinateur. En effet le protocole « JenNet » a une portée de 10 à 100m à cause de la puissance d'émission limitée. Utilisation limitée à une maison ou un appartement.

Réseau maillé : Ce type de réseau ne contient pas de modules dédiés au routage d'information. Tous les modules sont donc des ED et peuvent faire transiter les données des autres capteurs.

L'avantage est que si un chemin est coupé (Chemin bleu sur la figure 2) avec un ED qui n'est pas en état de fonctionner, l'information peut en emprunter un autre (Chemin vert sur la figure 2). Il est donc possible de mettre tous les modules ED en mode « sleep ».

Le problème reste de gérer les « réveils » car si les modules ne sont pas parfaitement synchrones il y a un risque de perte de données.

Réseau en arbre : C'est ce type de structure qui a été choisi lors du démarrage de ce projet.

Le point positif de ce type de réseau est la fiabilité des transferts de données. Les routeurs ne sont là que pour relayer les informations, sans possibilité de faire des mesures (ce qui est dommage car on ne peut pas directement connaître l'état de santé du routeur -énergie en stock-). Les ED ne communiquent qu'avec les routeurs ou le coordinateur.

Le point négatif est le fait que les routeurs ne peuvent être mis en mode « sleep » ce qui entraîne une consommation importante de ces modules.

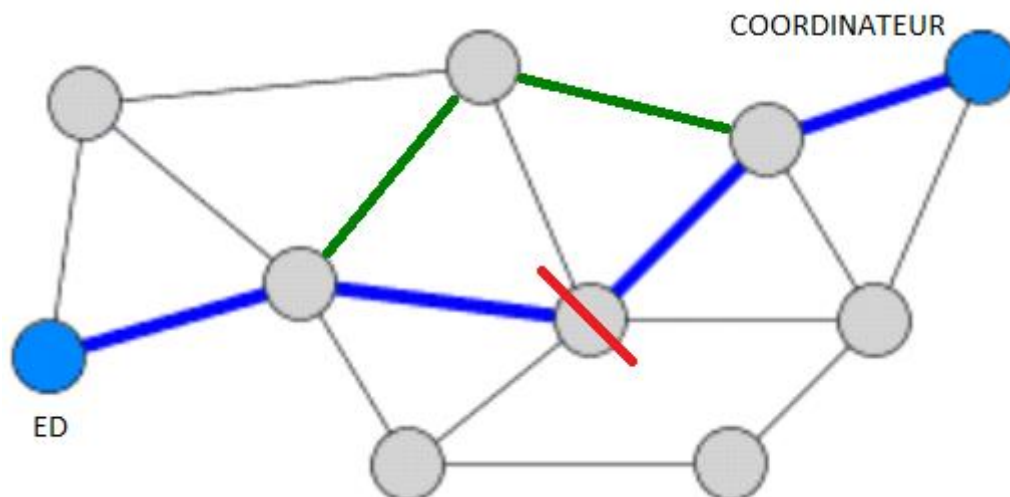


Figure 2 : réseau maillé dans le cas d'une défaillance d'un ED

3. Points essentiels pour la consommation

3.1.Compositions des modules

Un module complet est l'assemblage des trois cartes connectées ensemble grâce à des connecteurs (Annexe A). Chaque type de carte assure un ensemble de fonctions.

Quelles que soient les modules utilisés (coordonateur, un routeur, ou un ED), certaines fonctions sont toujours présentes. Selon la tâche du module il peut y avoir trois cartes au maximum (Voir figure 3).

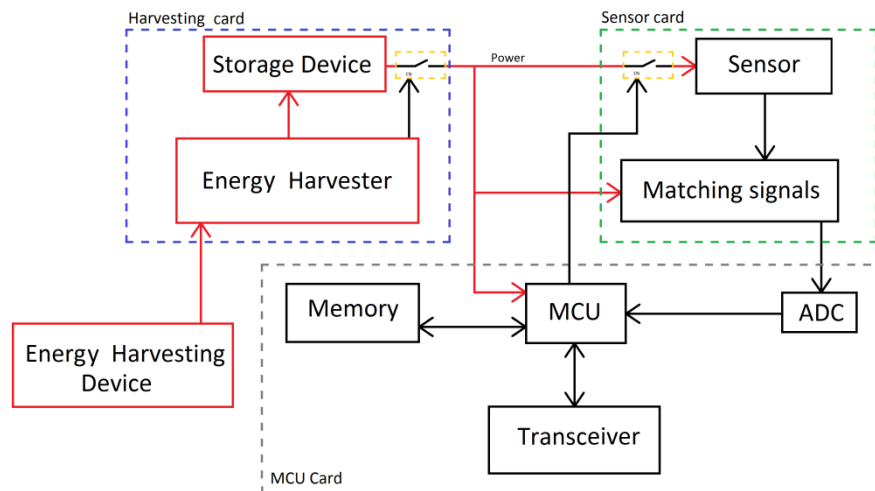


Figure 3 : schéma des trois parties d'un module

Pour les trois modules nous avons :

La **carte « Jennic »** avec l'antenne et le microcontrôleur (Jennic 5139 ou 5148) qui permet d'envoyer ou de recevoir des informations mais aussi de programmer les différentes tâches que doit accomplir le module.

La deuxième **carte « mesure »** permet d'interfacer avec la carte Jennic et de mettre en forme les informations issues des capteurs. Pour éviter que la carte ne consomme de l'énergie pendant les phases de sommeil on met un interrupteur commandé (TPS2101) entre l'alimentation et la carte elle-même.

Pour finir on a une **carte « énergie »**, qui ne concerne que les modules routeurs et ED. Le coordonnateur est directement relié à un ordinateur et il n'a donc pas besoin de cette carte. Cette carte permet le stockage de l'énergie et selon les modèles la récupération de l'énergie ambiante. Le modèle le plus simple ne comporte qu'un simple support de pile pour le stockage de l'énergie.

3.2.Fonctionnement du Jennic

Les deux Jennic utilisés sont le JN5148 (Figure 4) et le JN5139 qui sont quasiment identiques. En effet la partie programmation est identique pour les deux Jennic. Les différences notables sont la vitesse de fonctionnement du microprocesseur (32Mhz pour le JN5148 contre 16Mhz pour le JN5139) et la taille ou le nombre de périphériques du microprocesseur. Chaque Jennic donne le choix dans la puissance d'émission et de réception pour adapter le réseau aux contraintes de l'application. La puissance d'émission est constante c'est-à-dire que quel que soit la distance séparant deux modules, la puissance ne varie pas. On peut retrouver les points identiques et les différences dans le tableau en annexe B.

La partie alimentation peut être effectuée par une batterie, le cordon USB (pour le coordinateur) ou le secteur (avec un régulateur). Nous ne nous concentrerons pas sur la partie secteur ni sur le cordon USB. Pour notre utilisation nous n'utilisons que certaines entrées/sortie du Jennic. Pour le load switch de la carte « mesure » la commande est gérée grâce à une sortie numérique. Les capteurs à sorties analogiques doivent être connectés aux différentes entrées ADC (Analog to Digital Converter) du Jennic. Dans notre cas nous avons un ADC 12 bits avec une tension d'entrée entre 0 et 2,4V. Nous aurons donc une précision de 586µV/LSB en pleine échelle. Dans notre programme nous récupérons la valeur brute de l'ADC. Il faut ensuite retrouver la valeur en mV en entrée de l'ADC pour pouvoir exploiter les résultats. Pour cela nous utiliseront l'équation : $V = \frac{Val_{adc}}{1735}$ (V en Volt et Val_{adc} la valeur numérique en sortie de l'ADC - Annexe C pour la caractérisation de l'ADC-). La majorité des capteurs donnant une valeur en mV il suffit de faire la conversion en mV pour retrouver la tension en entrée du convertisseur. En fonction de la caractéristique du capteur (linéaire pour les capteurs utilisés), une ligne de code dans le programme permet de traduire la mesure dans l'unité adaptée au mesurande.



Figure 4 : photo d'une carte Jennic avec une antenne externe

La programmation du Jennic est faite en C. Dans un programme on peut différencier deux parties. La partie gestion de réseau qui ne doit pas être modifiée, réalisée par les stages précédent et la partie gestion carte mesure qui peut être modifiée par l'utilisateur (Annexe D). Le digramme de flux nous montrant le séquençement du programme est présenté ci-dessous figure 5 :

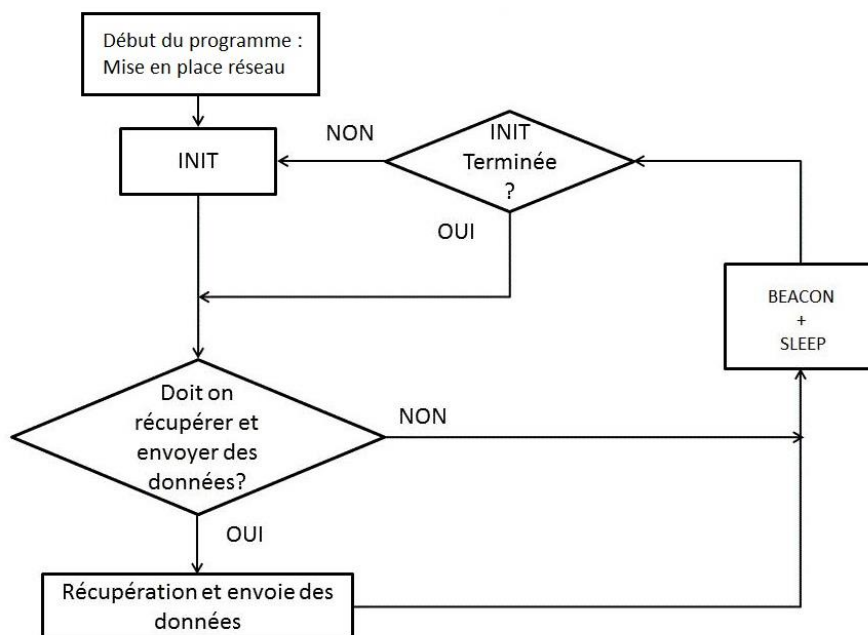


Figure 5 : Diagramme de flux de la partie récupération des données.

3.3. Analyse consommation routeurs

Dans notre topologie en arbre les routeurs doivent être à l'écoute en permanence du réseau. En effet les ED et les routeurs n'ont aucune synchronisation donc les routeurs ne peuvent pas être mis en veille pour économiser de l'énergie. Nos modules ont une consommation d'environ 45mA (image du courant du routeur sous 3,6V avant le régulateur 2,7V du Jennic) en permanence donc c'est le point le plus important d'un réseau en arbre au point de vue de la consommation. Pour pouvoir être le plus possible en champ libre avec le coordinateur, on cherche à placer le routeur en hauteur, ce qui permet aussi de pouvoir récupérer plus facilement l'énergie solaire grâce à des panneaux photovoltaïques. On peut aussi, comme dans notre application, alimenter le routeur grâce au réseau EDF (bord d'une fenêtre) si celui-ci est disponible à proximité. Pour dimensionner le panneau solaire nécessaire, le logiciel calsol nous donne de l'énergie récupérable moyenne par jour (en KWh/jour) en fonction de la région choisie. Par exemple à Toulouse on peut espérer récupérer 1,01KWh/m²/j en moyenne au mois de décembre et 6,37KWh/m²/j au mois de juin. Pour le dimensionnement il faut évidemment tenir compte des rendements des panneaux solaires, du récupérateur d'énergie et de la batterie. Nous avons choisi respectivement 10% (rendement des panneaux polycristallins couramment utilisés dans les installations solaires), 70% (rendement minimum du BQ25504) et 66% (rendement d'une batterie nickel-hydrure -NimH- que nous utilisons).

Pour trouver la surface nécessaire pour avoir une autonomie de 3 jours nous l'énergie nécessaire récupérée grâce aux panneaux solaire est de :

$E = n_{\text{jours}} * I_{\text{moy}} * h$ avec n_{jours} le nombre de jour d'autonomie souhaité, I_{moy} le courant moyen consommé par la batterie, et h le nombre d'heure dans une journée.

$$E = 3 * 0.045 * 24 = 3.24 \text{Ah pour 3 jours}$$

On peut donc en déduire la surface avec la formule :

$S = E / (\eta_{\text{tot}} * H_i)$ avec E l'énergie nécessaire, η_{tot} le rendement du système et H_i l'irradiance en KWh/m²/j (ici on prendra pour un mois de décembre)

Avec $\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{PV}} * \eta_{\text{récup}} * \eta_{\text{bat}} = 0,1 * 0,7 * 0,66 = 4,62\%$

Donc : $S = 3.24 / (0.0462 * 3 * 1010) \approx 231 \text{ cm}^2$ soit un peu plus d'un carré de 15cm de côté.

3.4. Analyse consommation des Ends Devices

3.4.1. Beacon

Une fois établi dans les premiers instants de la mise en route, le réseau doit être en permanence maintenu entre les modules. Pour cela il y a une courte communication à intervalles réguliers entre un module et son supérieur (Ex : ED et routeur). Ce beacon (Annexe E) est géré par le protocole de communication Jennet et donc est standardisé. Il dure environ 10ms et consomme 13mA sous 3,6V (tension de la pile). Il n'y a pas de temps minimum entre 2 beacons mais il y a un maximum car au-delà d'un certain temps entre 2 beacons le réseau est perdu et donc l'ED se met en recherche de réseau.

3.4.2. Perte de réseau

La recherche de réseau est gérée par le protocole Jennet et consomme en moyenne 4mA sous 3,6V tant que le réseau n'est pas remis en place entre l'ED et le routeur ou le coordinateur. Par comparaison en mode sleep le module ED consomme 4μA sous 3,6V. Il faut donc éviter le plus possible la perte de réseau sans quoi l'autonomie en est très largement amputé. (Annexe F)

3.4.3. Envoi des données

L'envoi des données s'effectue après l'acquisition des données par le Jennic (Annexe G). On peut donc envoyer des données à chaque réveil ou sinon attendre plusieurs réveils avant d'envoyer une donnée au coordinateur. Par exemple pour envoyer des données 1 fois par minute il suffit de faire 9 réveils de jennic avec 6s entre les réveils. Soit 8 beacons et 1 beacon + données. La durée des beacons et la durée d'acquisition des données n'étant pas nulle on perd quelques millisecondes donc on ne peut pas mettre un beacon de plus.

Le temps d'acquisition des données dépend principalement du temps d'activation des différents capteurs présents sur la carte et du temps de conversion des ADC. Il faut donc attendre que la donnée physique en sortie du capteur (tension, courant, ...) soit stable avant de faire une acquisition. En général l'ordre de grandeur est la dizaine de milliseconde au maximum.

3.4.4. Mode sleep

Le mode sleep du Jennic est le mode durant lequel la consommation est minimale pour permettre une grande longévité du module. Pour cela seul un timer (32Khz) et une mémoire RAM sont activés. La mémoire permet de stocker et de ne pas perdre la partie programmation du jennic. Le timer est programmé à la mise en veille du jennic et quand ce timer arrive à 0 il y a une interruption dans le programme et le jennic entame la routine de réveil. La durée du mode sleep est limitée par le fait qu'il faut maintenir le réseau grâce aux beacon.

3.4.5. Autres points à considérer

Mis à part ces phases de consommation imposées par le réseau Jennet il est possible d'avoir une consommation élevée liée à des problèmes matériels ou logiciels. Par exemple certains récupérateurs peuvent avoir des courants de fuite lorsqu'il n'y a pas assez d'énergie récupérable. En effet le BQ25504 a un courant de fuite de 10μA quand il ne récupère pas d'énergie. Sur une application avec des panneaux solaire, la nuit, on a donc une consommation globale du Jennic de 14μA au lieu des 4μA initialement prévu. Soit plus de 3 fois plus et donc une autonomie grandement réduite.

De plus si les sorties du Jennic ne sont pas imposés à un état bas ou haute impédance avant la mise en sleep alors ils sont automatiquement à l'état haut ce qui entraîne une consommation élevée du module.

Il a fallu chercher la bonne configuration d'état des entrées/sorties pour pouvoir avoir le minimum de consommation durant la période sleep. Solution trouvée en début de stage (expliqué en annexe D).

Pour avoir une estimation de l'autonomie des modules en fonction de la consommation ainsi que la taille de la récupération d'énergie nécessaire des modules (TEG ou PV), j'ai réalisé un fichier Excel pour faciliter les calculs (Annexe H)

Toutes ces phases différentes de consommation d'énergie peuvent être identifiées dans la figure mise en annexe I. On peut remarquer des pics de consommation qui sont liés au fonctionnement du LT1111 qui créer des pics de courant à sa mise en route (quand la tension descend en dessous de 5V)

3.5.Choix des capteurs

Les capteurs sont une partie importante dans l'élaboration d'un module. Il faut tout d'abord savoir si on peut utiliser des capteurs numériques ou analogiques.

Un point très important est la possibilité d'avoir une alimentation du capteur compatible avec une alimentation de type accu qui n'est pas forcément stable dans le temps. En effet l'ajout d'un convertisseur qui permet d'abaisser ou de monter la tension (Buck ou Boost) entraîne une plus grande consommation liée au rendement du convertisseur. Certains capteurs ont besoin d'une tension symétrique ce qui rajouter des composants pour réaliser cette alimentation. On a donc encore une fois une plus grande consommation. Par exemple, dans les stages précédent on pouvait voir un régulateur de tension boost (LT1111) combiné à un inverseur de tension pour passer d'une tension de 3,6V de la pile à du $\pm 5V$ pour un capteur de température et pour un pyranomètre. Cette solution a été simplifiée en sélectionnant des capteurs avec une plage d'alimentation compatible avec une pile.

La consommation du capteur est aussi à prendre en compte puisque dès qu'il y aura activation du capteur il ne faut pas que la consommation demandée soit trop importante pour l'accu.

Un autre point qui est essentiel est le temps de réponse du capteur. Celui-ci permet de fixer le temps d'activation de la carte « mesure » et donc la consommation du module. Plus la carte reste activée pour la stabilisation ou le temps de conversion et plus le module consommera. Sur ce point-là les capteurs analogiques ont un avantage certain sur les capteurs numérique. Par exemple un capteur de température que nous avons utilisé (LMT86) a un temps de réponse d'environ 1ms (voir figure 6) alors que le capteur de température numérique a un temps de conversion de 250ms (pour une résolution sur 12 bits avec le capteur MCP9800 de chez microchip).

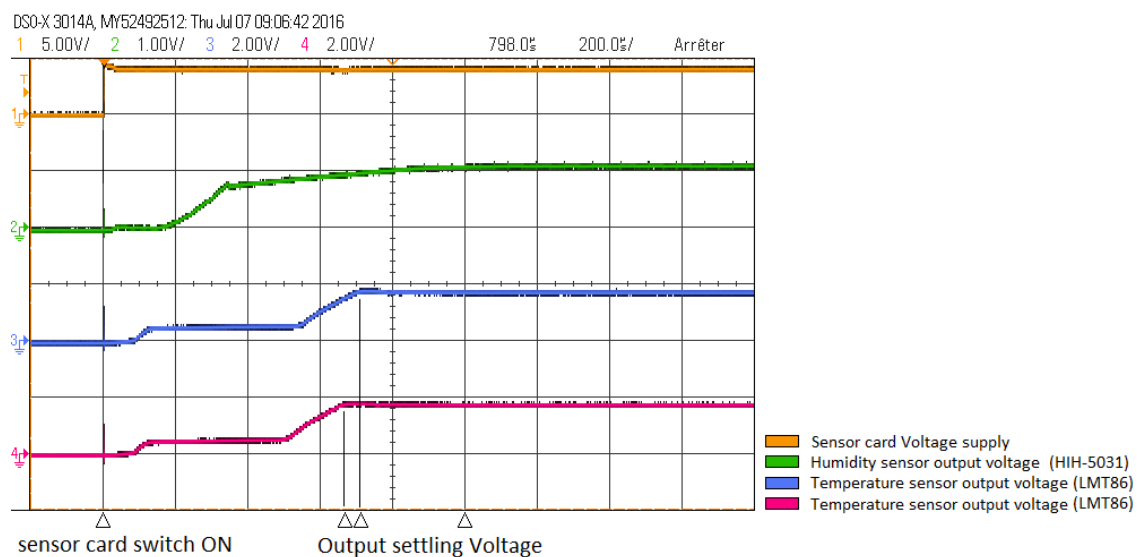


Figure 6 : Tension de sortie de trois capteurs analogiques (courbes du bas) suite à la mise sous tension du module (courbes du haut)

4. Données et Dimensionnement

4.1. Données récupérées grâce aux ED par le coordinateur

Dans cette partie nous allons analyser les capteurs qu'on a utilisés. Dans le tableau 2 j'ai listé les types de données récupérées par les différents ED avec leurs méthodes de récupération que nous avons sur nos cartes mesure. Pour tous les types de données que nous utilisons la sortie est une tension ou un courant. En effet la tension et le courant sont l'image de la grandeur physique étudiée. Il faut donc mettre en forme les signaux de sortie des capteurs pour pouvoir faire un traitement numérique de l'information afin de pouvoir retrouver les grandeurs physiques. Il s'agit donc d'insérer un ou plusieurs étages d'amplifications pour pouvoir avoir une bonne résolution.

Type de données récupérées	Méthode de récupération	Références	fabricant
Température	Capteurs et ADC du Jennic	LM35DZ, LMT86	texas instruments
Humidité	Capteur et pont diviseur	HIH-5031-001	honeywell
Irradiance	Capteur et amplification	sp lite2 pyranomètre	Kipp & Zonen
Vibration	Capteur et monostable	AU2402-1	Assemptech
Tension de la batterie du module	ADC du Jennic et pont diviseur		

Nous **Tableau 2 : récapitulatif des types de données récupérées avec leur méthode de récupération associé** allons

maintenant voir la composition d'une carte « mesure » que j'ai conçue grâce au logiciel DipTrace et fabriquée dans les locaux de l'UPS. Il s'agit d'une carte qui permet de mesurer la tension de batterie du module ED, deux températures et un pourcentage d'humidité. Le typon de la carte en 3D (figure 7) nous montre que le nombre de composants n'était pas un facteur limitant dans la conception de cette carte de mesure. Les capteurs sont connectés aux borniers (U1 U2 et U3) pour pouvoir les déporter de la carte et mesurer différents points. Par exemple dans notre cas dans et hors d'une ruche d'abeilles pour la température. Ici au centre il y a un interrupteur commandé (TPS2101) par le Jennic qui permet de n'alimenter la carte que quand on veut faire des mesures. Les capacités (C1, C2, C3 et C4) sont des capacités de découplages pour éviter que les signaux ne soit trop bruités. Les couples de résistances R1, R2 et R3, R4 permettent respectivement d'abaisser la tension de sortie du capteur d'humidité et de diviser par deux la tension de la batterie pour pouvoir faire la conversion grâce à l'ADC du Jennic.

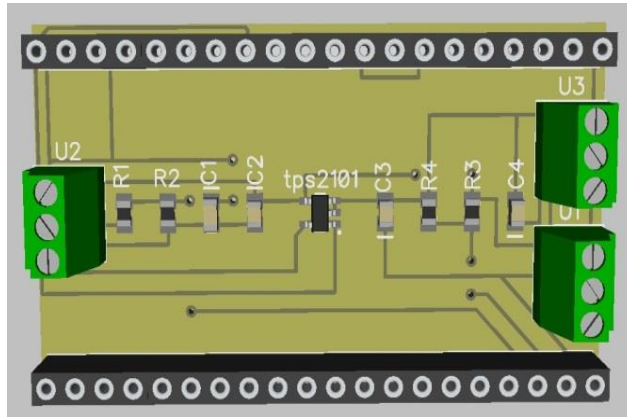


Figure 7 : Carte mesure réalisée

Nous avons donc maintenant des valeurs numériques en sortie des ADC. Pour cela nous utilisons les datasheet fournis avec les capteurs pour trouver les bonnes équations. Les principales formules utilisées sont :

Pour rappel nous avons vu que la conversion de l'ADC est : $V = \frac{Val_{adc}}{1735}$ avec V en Volt et $0 < Val_{adc} < 4095$

4.1.1. Capteurs de temperature

Capteur LM35 :

Basic Centigrade Temperature Sensor
(2°C to 150°C)

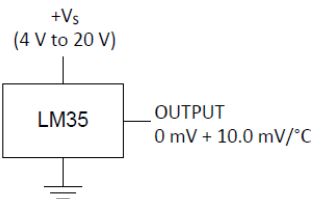
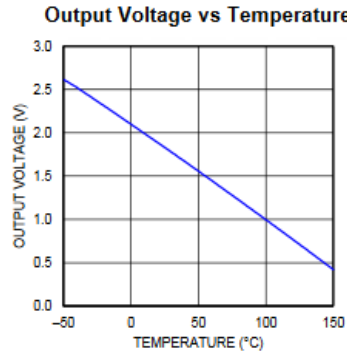


Figure 8 : branchement du capteur de température LM35

Comme c'est un capteur linéaire on peut déduire la température à partir de la valeur donnée par l'ADC :

$$T_{LM35} = \frac{Val_{adc}}{1735} \times 0,01 = \frac{Val_{adc}}{17,35}$$

Capteur LMT86 :



$$V_{TEMP}(mV) = 1777.3mV - \left[10.888 \frac{mV}{^{\circ}C} (T - 30^{\circ}C) \right]$$

Figure 9 : Extrait du datasheet du LMT86

Grâce à l'extrait du datasheet du capteur LMT86 (figure 9) on trouve l'équation :

$$T_{LMT86} = 191,53 - \frac{Val_{adc}}{19,05}$$

Capteur interne au Jennic :

Ici en considérant de datasheet en annexe J on peut en déduire la température du capteur interne au Jennic :

$$T_{INT} = - \frac{Val_{adc}}{3,123} + 439$$

4.1.2. Capteur d'humidité

HIH-5030 :

Pour ce capteur d'humidité la datasheet nous renseigne (voir figure 10) sur la tension de sortie du capteur en fonction de la tension d'alimentation et du pourcentage d'humidité.

Voltage output (1st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.00636(\text{sensor RH}) + 0.1515)$, typical at 25 °C
--------------------------------------	---

Figure 10 : Screenshot du datasheet du HIH-5030

La tension de la batterie est récupérée grâce à un pont diviseur car c'est le moyen le plus économique et le plus facilement réalisable qu'on ait trouvé. On a donc choisi de mettre deux résistances identiques à 220kΩ entre l'alimentation et la masse pour pouvoir avoir la moitié de la tension d'alimentation entre les deux résistances. Cette valeur de résistance permet de ne pas perturber le fonctionnement de l'ADC et d'avoir une consommation raisonnable (8,2μA sous 3,6V en négligeant la consommation dans l'ADC)

On obtient donc : $V_{supply} = \frac{Val_{adc}}{0,868}$ (V_{supply} en Volt)

Le pourcentage d'humidité est donc obtenu grâce à la formule suivante :

$$\%RH = \left(\frac{157,2 \times Val_{adc}}{V_{bat} \times 1,735 \times 0,566} \right) - 23,82 = 160,1 \times \frac{Val_{adc}}{V_{supply}} - 23,82$$

4.1.3. Mesure de l'irradiance

Splite 2 :

La sensibilité du pyranomètre est de $80\mu A/W/m^2$. Le maximum lors journée ensoleillée donne environ $1000 W/m^2$ donc $80mA$ (Voir la caractérisation en annexe L). Dans le stage précédent la solution mettant un amplificateur à transconductance a été implémenté sur une carte et donc cette solution permet à la fois de transformer un courant en tension mais aussi de d'amplifier le signal pour avoir une plus grande précision à l'entrée de l'ADC. Le calcul permettant de retrouver l'irradiance à partir de la valeur de l'ADC est :

$$Irradiance = \frac{Val_{adc}}{3.97315};$$

4.2. Exploitation des données récupérées

Les données recueillies par les ED sont envoyées pour le coordinateur à travers ou non des routeurs pour être ensuite traitées par un programme labview. Cette récupération est traitée par un programme interne aux ED. En effet les données numériques (des entiers) sont mises en forme (chaîne de caractère) avant d'être envoyé et décodé par le coordinateur.

4.2.1. Récupération d'énergie

La récupération d'énergie représente une part importante dans le choix des composants utilisés. La création d'une carte « énergie » dédié à la récupération et au stockage permet alors d'étendre la durée de fonctionnement des modules. La composition de cette carte est la partie récupération d'énergie avec le BQ25504 (pour le TEG ou le solaire) ou le SPV1040 (pour le solaire) et la partie stockage avec un support de pile bouton. Les différents systèmes de récupération d'énergie n'ont pas les mêmes caractéristiques. Que ce soit pour l'intensité du courant maximum, le point maximal de puissance récupérable (MPP en anglais pour maximum power point) ou encore la tension de sortie pour le stockage de l'énergie, les systèmes de récupération d'énergie doivent donc correspondre aux attentes voulues. Le STV1040 récupère l'énergie des panneaux solaires et a un double avantage. Il a un courant d'entrée maximum important ($1,8A$) et a un MPPT directement programmé sur la puce qui permet de récupérer le maximum d'énergie disponible à partir des panneaux solaires. Le BQ25504 a quant à lui un courant maximum d'entrée de $500mA$. On peut choisir la fraction de la tension de circuit ouvert (Voc) pour chaque type de récupération d'énergie pour avoir le maximum de puissance récupérable par le module (Annexe K). Par exemple environ 75% de Voc pour le solaire et 50% pour le thermo générateur. Sur la carte « énergie » du BQ25504 il y a aussi un interrupteur (load swithc TPS2101) commandé par une sortie du récupérateur qui permet de ne pas alimenter le circuit si la tension de stockage ou des panneaux est inférieure à une certaine valeur.

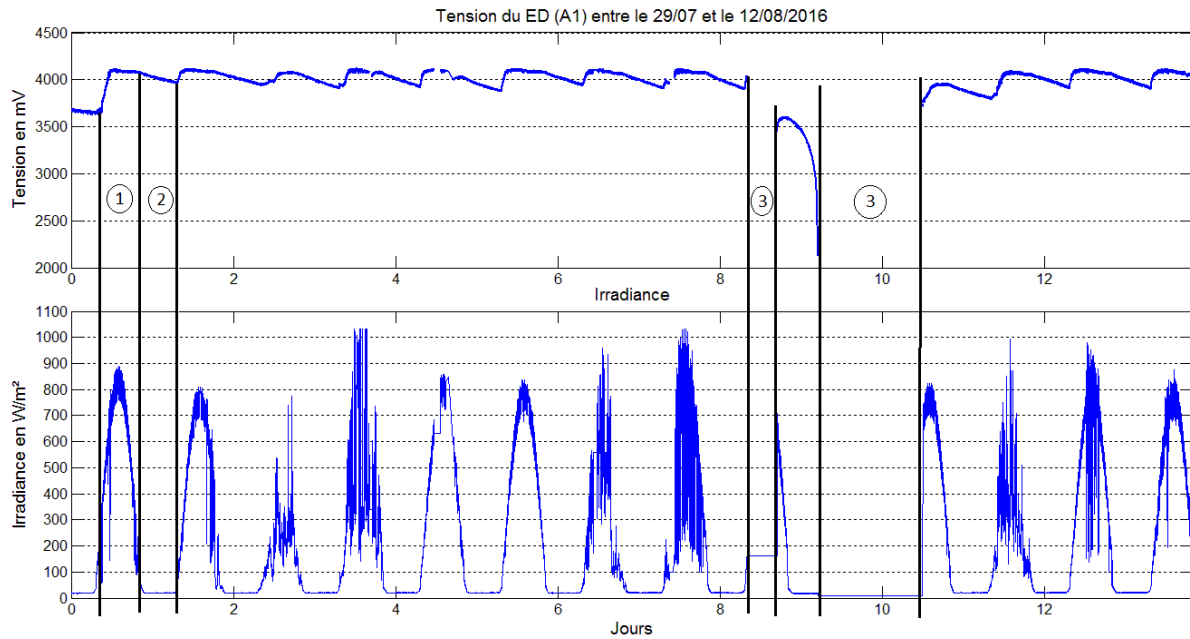


Figure 11 : tension d'un ED (courbe du haut) avec une récupération d'énergie solaire et l'irradiance associée (courbe du bas)

Sur la courbe du haut (figure 11) on peut voir toutes les phases d'un module avec récupération d'énergie. Sur la courbe du bas (figure 11) on peut voir l'irradiance récupérée grâce au pyranomètre (splitte 2) posé horizontalement sur le sol. Il s'agit d'un ED avec récupération d'énergie grâce à des panneaux solaire. On peut noter 3 phases remarquables :

- La première (1) est le fonctionnement sans récupération d'énergie, la nuit ou quand il ne fait pas beau (le 3eme jour par exemple). On voit donc que la tension aux bornes de la pile bouton LR25504 décroît légèrement.

- La deuxième phase (2) est donc la récupération d'énergie visible à partir du moment où la tension aux bornes de la batterie augmente.

- Cela fait suite à la 3eme phase (3) remarquable qui est la perte de réseau. En effet lorsque le réseau est perdu, en plus de ne pas communiquer d'informations, la consommation est augmentée très sensiblement. Sur cet ED on passe d'une consommation moyenne avec l'envoi des données comprise de 30µA à 3mA soit 100 fois plus. Il est donc normal que quand le réseau est de nouveau rétabli la tension aux bornes de la pile ait chuté. La perte de réseau peut être due à un problème dans le cheminement des informations (routeur défaillant ou ED trop loin du réseau) ou à un problème d'énergie (la batterie est déchargée).

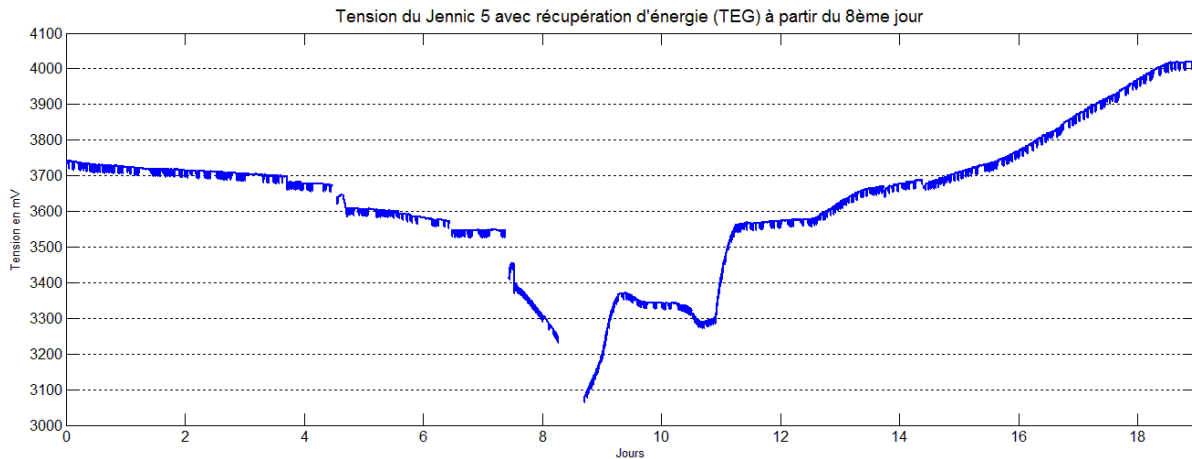


Figure 12 : tension aux bornes d'un ED avec récupération d'énergie thermique

Sur la figure 12 le TEG n'était pas correctement fixé jusqu'au 9^{ème} jour donc la récupération d'énergie n'était pas présente. Une fois replacée et le gradient de température présent on retrouve le bon fonctionnement de la récupération d'énergie.

Dans notre mise en place le gradient de température est pris entre la sortie d'un ballon d'eau chaude et l'air ambient (Annexe M).

Le choix de la taille du TEG dans les stages précédents a été faite de manière arbitraire. En effet le dimensionnement d'un TEG est très difficile à faire car le gradient est souvent variable et d'une précision minime. De plus la tension aux bornes de celui-ci étant variable en fonction du gradient de température, la puissance récupérée n'est pas précisément déduite. Il faut donc sur-dimensionner le TEG pour être sûr de pouvoir alimenter le module correctement pendant toute la durée voulue.

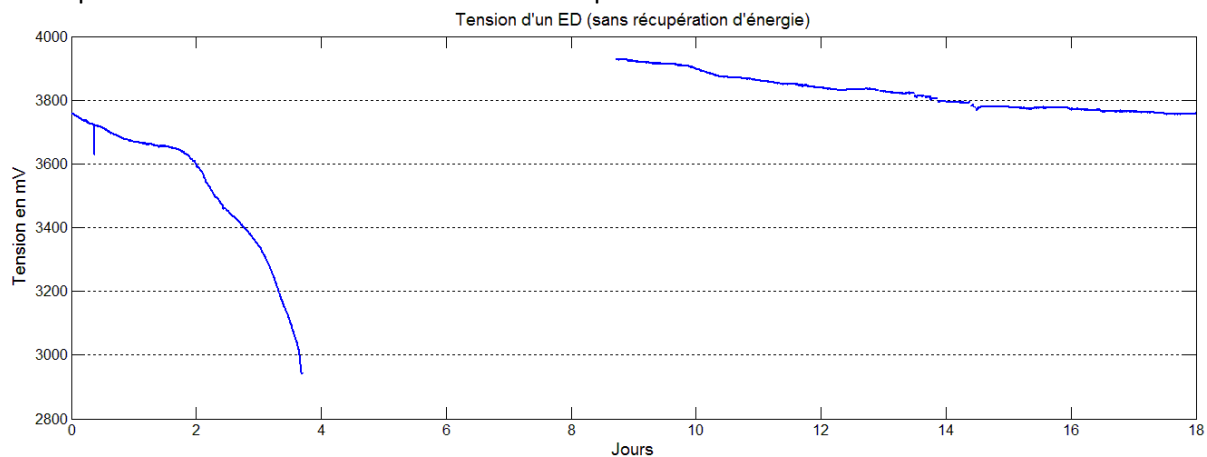


Figure 13 : Tension d'un ED sans récupération d'énergie

Voici un autre ED (Figure 13) mais lui sans récupération d'énergie. On voit que quand la capacité de la pile est épuisée la tension chute rapidement. Sinon quand la pile est dans sa zone de fonctionnement normale la tension décroît presque linéairement.

4.2.2. Données des capteurs

Capteurs de température :

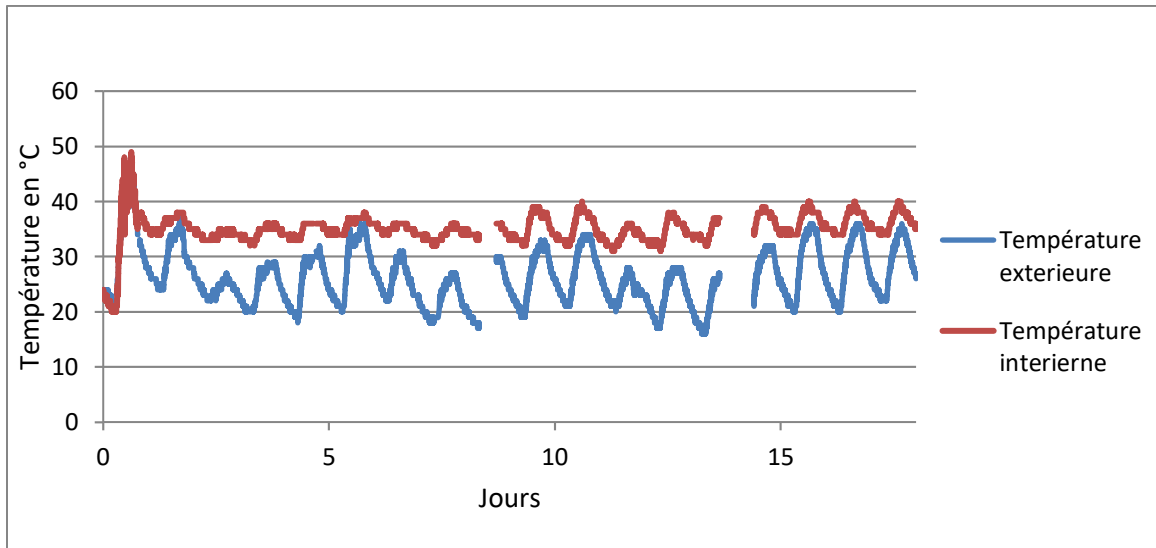


Figure 14 : température interne et externe d'une ruche

Tout d'abord les 'marches d'escalier' (figure 14) ne représente pas une sensibilité numérique puisque les capteurs sont analogiques et les ADC utilisés sont des ADC 12 bits. Pour une question de facilité de codage nous avons choisi de donner la température au degré près donc la partie entière de la température. Dans la partie programmation la fonction qui permet d'envoyer les données impose de faire transiter des chaînes de caractères. Or on peut facilement passer d'un nombre entier en une chaîne de caractère mais le traitement des nombres relatif est une chose plus compliquée à coder.

Ces résultats sont donnés du 29/07/2016 au 15/08/2016. On retrouve donc les 2 pertes de réseau du Jennic citées plus haut. On remarque aussi que la première journée les deux capteurs de températures qui étaient au même endroit (à l'extérieur) donne exactement la même température. Une fois l'un mis dans la ruche et l'autre à l'extérieur on voit que dans la ruche la température est régulée par les abeilles. La température est plus chaude car pour ne pas les déranger nous avons mis le capteur juste en dessous du toit donc la température est plus chaude que dans le corps de la ruche. La fonction de régulation de la température des abeilles dans une ruche est donc bien respectée car sur l'autre capteur nous avons bien une variation plus importante de la température.

Capteurs d'humidité :

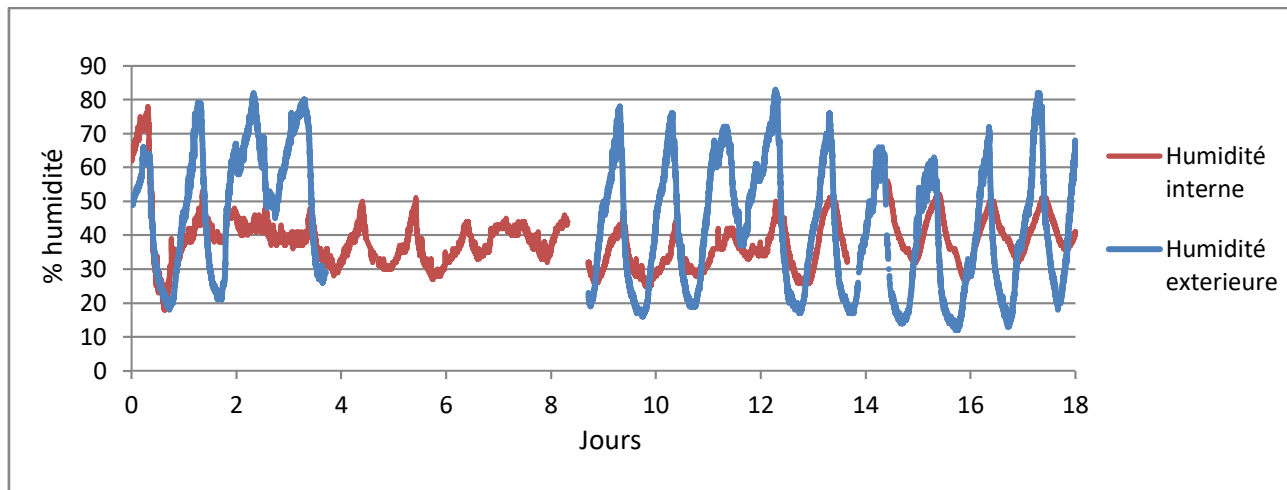


Figure 15 : humidité interne et externe d'une ruche

Ces deux courbes (Figure 15) sont obtenues grâce à deux modules ED différents. L'humidité interne à la ruche (courbe rouge) est obtenue par le Jennic 1 et l'humidité extérieure (courbe bleu) par le Jennic 12. Pour l'humidité nous retrouvons les conclusions que pour la température à savoir la régulation de l'humidité à l'intérieur de la ruche par rapport à l'extérieur. Pour une journée ensoleillée (Annexe N) On voit que le maximum d'humidité est aux alentours de 7h30 avec 80% ce qui correspond à la rosée du matin et le minimum vers 17h avec 20%.

Capteur de vibration :

Le capteur de vibration permet dans l'application du biogaz de savoir quand un moteur de cogénération est en fonctionnement. Dans le stage précédent la méthode de récupération du signal du capteur de vibration est de mettre un monostable (le SN74LVC1G123) en sortie du capteur pour augmenter le temps de détection d'une vibration (Annexe O). Un compteur a été rajouté dans la partie programmation pour permettre de compter le nombre de minutes de fonctionnement du moteur.

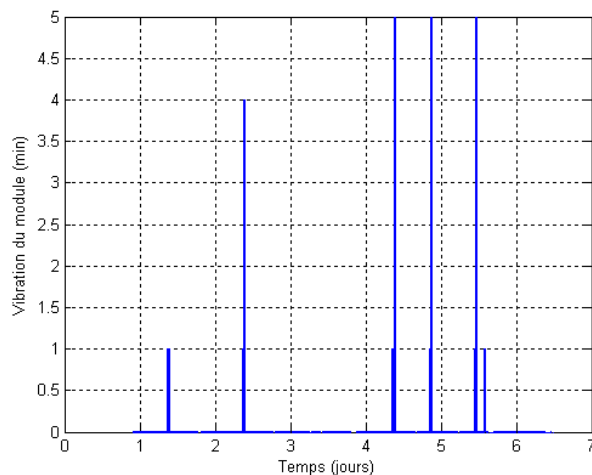


Figure 16 : Temps de vibration du capteur de vibration en fonction de la journée

Sur la figure 16 on voit la durée de fonctionnement d'un capteur de vibration (voir diagramme de flux en annexe P et sa programmation en annexe Q) accroché à une machine à laver. On remarque qu'il y a un problème car les temps ne correspondent pas aux temps de fonctionnement d'une machine à laver. Cela nous montre bien l'importance du choix des capteurs et de la sensibilité de ceux-ci.

4.3.Outils utilisé pour effectuer les mesures

La pince ampèremétrique (photo 1 Annexe R)

Permet de mesurer un courant et d'afficher son image sur un oscilloscope. Elle permet donc de voir les changements dans les différentes étapes du programme (mode sleep, mode envoi, acquisition des données...). En pratique comme nous travaillons avec des courants faibles (ordre de la dizaine de μA) il faut faire plusieurs tours (100 tours) dans la pince pour avoir une plus grande précision. Le problème que cela engendre est que le bruit du signal est lui aussi amplifié. On ne peut donc pas mesurer avec précision le courant en mode sleep par exemple (environ $4\mu\text{A}$).

Analyseur de tension continue N6705B(photo 2 Annexe R)

Cet appareil nous permet de générer une tension d'alimentation pour les tests des différents modules. De plus les autres entrées permettent de relever et d'afficher une tension ou une intensité comme un oscilloscope. L'avantage est que le format des fichiers enregistré est exploitable par ordinateur par le logiciel Il permet aussi d'être plus précis que les oscilloscopes classiques pour la valeur du courant en mode sleep. L'inconvénient est que l'échantillonnage maximal est de 0,02 ms soit un point toutes les 20 μs donc plutôt lent par rapport à notre application. Par exemple le beacon dure 10 ms environ donc 50 points ce qui n'est pas assez pour voir toutes les variations du courant dans cette phase-là.

Le multimètre (photo 3 Annexe R)

L'élément basique mais indispensable pour avoir un ordre d'idée du courant ou de la tension en un point donnée du module. Il permet de repérer les mauvaises connexions sur les cartes L'inconvénient majeur est que le changement de calibre doit être fait à la main et trop lent pour avoir des mesures précises. Par exemple on passe de la consommation en mode sleep de (quelques micros ampères) à la transmission d'informations (quelques dizaines de milli ampère) en 1 milliseconde.

L'oscilloscope DSO-X 3014A (photo 4 Annexe R)

Permet d'avoir une bonne représentation temporelle des grandeurs voulues. La précision est plus grande qu'avec l'agilent Par contre il ne permet pas de travailler avec des valeurs basses de courant (vu avec la pince ampèremétrique ci-dessus)

Nous avons donc vu les différents outils qui permettent d'effectuer les premiers tests et d'obtenir une quantification du budget énergétique nécessaire pour chaque module. En effet Nous pouvons donc maintenant faire un bilan énergétique de chaque module en fonction des capteurs et de la récupération d'énergie voulu.

4.4.Prix

4.4.1. Prix de notre installation

Tous les composants utilisés dans le stage sont listé en annexe S. La carte « Jennic coute » environ 20€ avec la carte et les composants dédiés pour la fonctionnalité de la carte. La carte « mesure » que nous avons utilisée coute environ 25€ et la carte récupération dépend du type de récupération, du nombre de récupérateur (panneau solaire ou thermo générateur) et du type de stockage (pile, batterie etc...). Environ 20€ pour une carte de récupération et de stockage avec une pile bouton et récupération d'énergie solaire avec un panneau solaire. Un routeur et un ED coutent environ 60€. Dans notre application le routeur consomme plus que le ED donc la partie récupération d'énergie coute plus chère tandis qu'il n'y a pas de carte mesure. On peut donc concevoir un réseau de capteurs sans fil avec des caractéristiques uniques pour moins de 200€ si les modules n'ont pas tous une récupération d'énergie.

4.4.2. Prix du commerce

Les prix varient en fonction du nombre et du type de capteurs voulut. Le principal inconvénient est qu'il est difficile de pouvoir configurer entièrement le réseau de capteur voulut. Il faut donc acheter un ensemble de possibilités sans pour autant toutes les utiliser. On peut donc trouver des modules allant de quelques centaines d'euros (pour les plus basiques) à plus de 1000 € pour un réseau complet. Par exemple le kit de développement TEXAS INSTRUMENTS EZ430-RF2500 MSP430 qui n'a qu'un coordinateur et un ED mesurant une température, une tension et une puissance (sans récupération d'énergie) coute 118€ chez Farnell.

DISCUSSION

Après toutes ces analyses il en découle quelques améliorations possibles. Depuis le début du projet en 2011 des systèmes avec les mêmes fonctions que le Jennic ont vu le jour. Le CC2530 de chez texas instrument par exemple réalise quasiment les mêmes fonctions mais consomme deux fois moins et coute environ 10€ contre 20€ pour le Jennic vue plus haut. Cependant le prix des composants annexe au microcontrôleur ne varie pas beaucoup comparé au prix initial.

Une autre façon d'améliorer l'autonomie du dispositif serait de changer complètement de type de réseau. Le réseau maillé permet de pouvoir endormir les ED plus longtemps et donc éviter le beacon qui est un des freins à l'optimisation de la consommation. Dans ce cas-là il faut faire attention à la synchronisation des ED et du coup à la robustesse du réseau pour éviter les pertes d'informations.

Un autre point qui est difficilement démontrable scientifiquement est l'impact de la chaleur et de l'humidité sur la consommation. En effet les ED et les routeurs sont le plus souvent en extérieur donc la question de l'étanchéité thermique et hydraulique est une question à se poser dans le développement d'un réseau de capteur sans fils. Dans mon cas l'antenne étant souvent intégré au module il fallait un contenant dépourvu de métal (lié aux interférences avec les ondes) et fermé pour ne pas avoir d'infiltration d'eau (Figure 17)



Figure 17 : Photo d'un ED dans la boîte verte pendant l'expérience

CONCLUSION

Grâce à la miniaturisation des systèmes embarqués et à la popularisation des objets connectés il devient de plus en plus accessible aux personnes de se créer un réseau de capteurs sans fil mais des précautions doivent être prises pour réussir son implémentation.

Lors de ce stage, j'ai donc lister et apporter des solutions à certains problèmes liés à la consommation pour réduire les impacts sur la réussite du projet entrepris. Certains points comme la consommation de l'antenne ou l'alimentation des capteurs sont très difficiles à minimiser néanmoins la bonne sélection des composants permet de réduire la consommation des modules.

Sur la mise en place du réseau nous pouvons conclure que la solution expérimentée est fonctionnelle mais avec certaines limitations. Tout d'abord la consommation des routeurs est un point très difficilement réductible car ils ne peuvent pas être mis en mode sleep. De plus le choix de l'emplacement de ceux-ci doit être soigneusement choisi car la perte du réseau par un ED entraîne une surconsommation des ED et la perte des données de l'application.

Une fois ces problèmes résolus nous avons pu constater que ce type de réseau est facilement déployable dans une maison.

La structure en sandwich avec différentes cartes « énergie » ou « capteurs » possibles avec une connectique commune offre une modularité importante. Pour la carte « Jennic », il suffit de changer la partie programmation d'un Jennic pour qu'il puisse passer d'un ED à un routeur ou un coordinateur, ce qui simplifie la gestion du stock.

Nous n'avons utilisé que des capteurs analogiques lors de nos essais, il faudra donc peut-être envisager d'étudier l'implémentation des capteurs numériques sur nos cartes.

Pour conclure ce stage m'a apporté de la réflexion dans la démarche de la réalisation et de la mise en place d'un réseau de capteurs sans fil. Il m'a permis de pouvoir traiter des domaines totalement différents tels que la récupération d'énergie ou la programmation mais qui ont été regroupé dans ce stage.

Référence bibliographique

Thèses et articles scientifique :

Carolina Rojas Devia. Biogaz en vue de son utilisation en production d'énergie : séparation des siloxanes et du sulfure d'hydrogène. Génie des procédés. Ecole des Mines de Nantes, 2013. Français. NNT : 2013EMNA0074 tel-00824324

Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey
Tifenn Rault , Abdelmadjid Bouabdallah, Yacine Challal

Energy harvesting system for wireless body sensor nodes
Alessandro Liberale, Enrico Dallago and Alessandro Lazzarini Barnabei
Power Electronics Laboratory
Department of Electrical, Computer and Biomedical Engineering, University of Pavia
Via Ferrata 5, 27100 Pavia, Italy

Energy Consumption Analysis of ZigBee-Based. Energy Harvesting Wireless Sensor Networks
Jiaying Song and Yen Kheng Tan
Energy Research Institute Nanyang Technological University, Singapore 637553

Datasheet de tous les composants utilisés

Image :

<http://www.seatronic.fr/conseil/images/regulateur-solaire-mppt/puissance-tension-regulateur-mppt.png> (image mpp solaire)

<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/mar/~media/Images/Article%20Library/TechZone%20Articles/2013/March/Maximizing%20Energy-Harvesting%20Efficiency%20from%20Thermal%20Sources/article-2013march-maximizing-energy-harvesting-efficiency-fig3.jpg> (image mpp TEG)

http://arketic.com/sites/ecoenr/images/images_EcoENR/schema_installation_methanisation1.jpg

Outils de mesure :

1 : http://fr.farnell.com/productimages/standard/fr_FR/132755707-40.jpg

2 : http://www.alliancetesteq.com/sites/default/files/n6705b_large_600x255.png

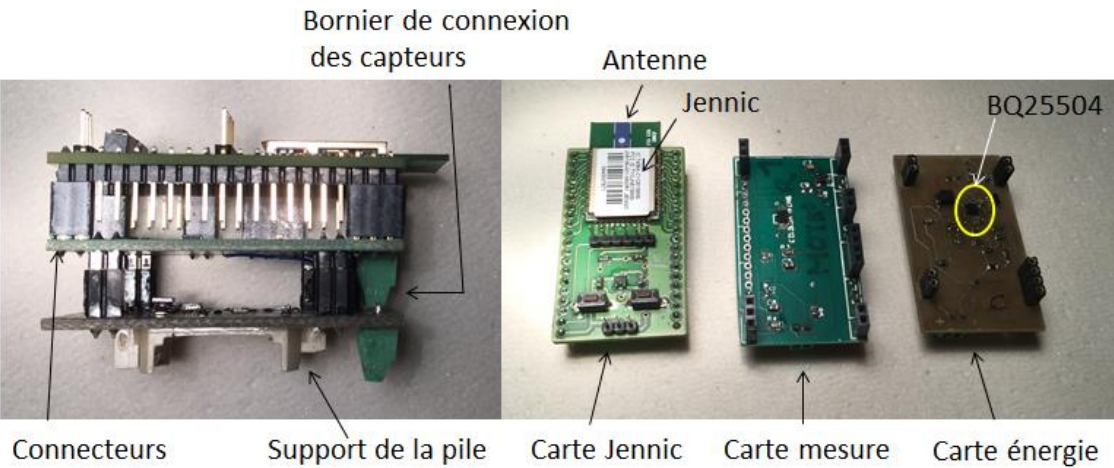
3 : <http://litbimg2.rightinthebox.com/images/384x384/201409/qjkjih1410937205175.jpg>

4 : [http://s7.images.keysight.com/is/image/Keysight/PROD-1945049-01?\\$HEROPRESET\\$](http://s7.images.keysight.com/is/image/Keysight/PROD-1945049-01?$HEROPRESET$)

<http://www.memoireonline.com/03/15/8967/Conception-et-mise-en-place-dune-plateforme-de-securisation-par-synthese-et-reconnaissance-biom45.png> (photo réseau cluster)

ANNEXE

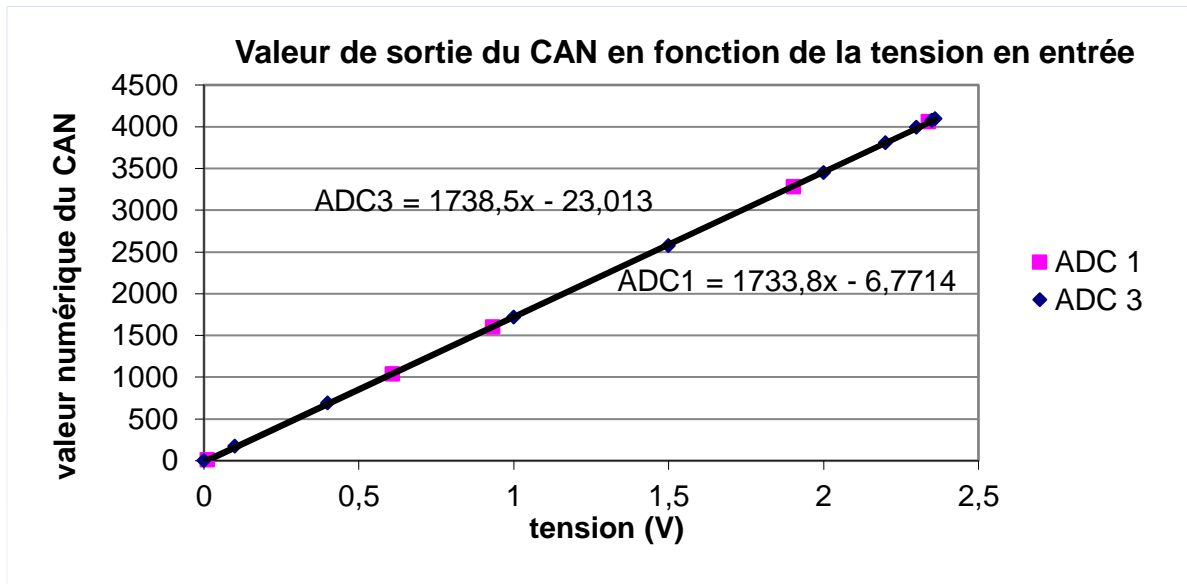
A. Photo du « sandwich » et des différentes cartes utilisée



B. Tableau récapitulatif des points communs et des différences des deux Jennic

JN5139	JN5148
<p>Features: Module</p> <ul style="list-style-type: none">• 2.4GHz IEEE802.15.4 & ZigBee compatible• 2.7-3.6V operation• Sleep current (with active sleep timer) 2.6µA• JN5139-xxx-M00/01/03 up to 1km range (ext antenna)<ul style="list-style-type: none">M00: on board antennaM01: SMA connectorM03: uFI connector◦ Receiver sensitivity -96dBm◦ TX power +2.5dBm◦ TX current 37mA◦ RX current 37mA◦ 18x30mm• JN5139-xxx-M02/04 up to 4km range<ul style="list-style-type: none">M02: SMA connectorM04: uFI connector◦ Receiver sensitivity -100dBm◦ 19dBm TX power◦ TX current 125mA◦ RX current 45mA◦ 18x41mm <p>Features: Microcontroller</p> <ul style="list-style-type: none">• 16MHz 32-bit RISC CPU• 96kB RAM, 192kB ROM• 4-input 12-bit ADC, 2 11-bit DACs, 2 comparators, temperature sensor• 2 Application timer/counters, 3 system timers• 2 UARTs (one for in-system debug)• SPI port with 5 selects• 2-wire serial interface• 21 GPIO• Evaluation kits available with full, unlimited, Software Development Kit <p>Temperature range -20°C to +70°C</p> <p>Lead-free and RoHS compliant</p>	<p>Features: Module</p> <ul style="list-style-type: none">• 2.4GHz IEEE802.15.4, JenNet and ZigBee PRO compatible• Sleep current (with active sleep timer) 2.6µA• JN5148-001-M00/03 up to 1km range (Ext antenna)<ul style="list-style-type: none">M00: integral antenna 18x32mmM03: uFI connector 18x30mm◦ TX power +2.5dBm◦ Receiver sensitivity -95dBm◦ TX current 15mA◦ RX current 17.5mA◦ 2.3-3.6V operation• JN5148-001-M04 up to 4km range (Ext Antenna)<ul style="list-style-type: none">◦ 20dBm TX power◦ Receiver sensitivity -98dBm◦ uFI connector◦ TX current 110mA◦ RX current 23mA◦ 18x41mm◦ 2.7-3.6V operation <p>Features: Microcontroller</p> <ul style="list-style-type: none">• 32-bit RISC CPU, up to 32MIPs with low power• 128kB ROM stores system code• 128kB RAM stores system data and bootloaded program code• 4Mbit serial flash for program code and data• On chip OTP efuse• JTAG debug interface• 4-input 12-bit ADC, 2 12-bit DACs, 2 comparators• 3 application timer/counters, 3 system timers• 2 UARTs• SPI port with 5 selects• 2-wire serial interface• 4-wire digital audio interface• Watchdog timer• Up to 21 DIO <p>Industrial temp (-40°C to +85°C)</p> <p>Lead-free and RoHS compliant</p>

C. Caractérisation du convertisseur analogique numérique



Tension	0,012	0,61	0,934	1,905	2,34
ADC 1	5	1035	1595	3279	4056

Tension	0	0,1	0,4	1	1,5	2	2,2	2,3	2,35	2,36
ADC 3	0	174	688	1715	2577	3448	3807	3990	4077	4094

D. Partie programmable par l'utilisateur

Strcat(x,y) permet de faire la concaténation de y avec x.

Itoa(x,y) permet de transformer un entier par sa valeur en chaîne de caractère.

eJenie_SendData(a,b,c,d) envoie la chaîne de caractère b au coordinateur

vAHI_DioSetDirection(x,y) permet de mettre en entrée ou en sorti les ports : 4,3 mettra le port DIO2 en entrée et les ports DIO0 et DIO1 en sortie. C'est la valeur mise qui détermine les ports à attribuer (en binaire)

vAHI_DioSetOutput(x,y) : même principe que pour la direction mais permet de mettre les ports de sortie à 0 ou à 1. En reprenant l'exemple on pourrai avoir 1,2 c'est-à-dire le port DIO0 à 0 et DIO1 à 1.

((uint32)(Rd_ADC(x))) permet de faire l'acquisition de la valeur de l'ADC x et de mettre la valeur en long

eJenie_Sleep(x) permet de mettre en sleep le Jennic pendant la durée prédéfini dans le programme.

```

case APP_STATE_RUNNING:
    /*****
    * do all necessary processing here *
    *****/
    if (k < 50) //envoi un wake sur 3
    {
        strcat(str_ADC1,";;; X INIT k= ");
        itoa(k,ADC3);
        strcat(str_ADC1,ADC3);
        eJenie_SendData(0,str_ADC1,70,TXOPTION_SILENT);
    }

    if (k==50) //envoi un wake sur 3
    {
        vAHI_DioSetDirection(0,1);
        vAHI_DioSetOutput(1,0); waitMS(10);
    }

```

Phase d'initialisation: INIT

Mise à 1 de la sortie DIO 1 (load switch de la carte « mesure ») puis attente de 10ms pour laisser les capteurs se stabiliser

```

xx = 0;
ADC1_Result = 0;
while(xx<8)
{
    ADC1_Result = ADC1_Result + ((uint32)(Rd_ADC(E_AHI_ADC_SRC_ADC_1)));
    // On récupère la valeur de l'ADC 3 .
    xx ++;
};
ADC1_Result = ADC1_Result>>3;
// on fait la moyenne par 8 des valeurs brutes

```

Récupération de la valeur de l'ADC 1 en faisant la moyenne de 8 valeurs prises à la suite pour une meilleure précision.

```

xx = 0;
ADC2_Result = 0;
while(xx<8){
    ADC2_Result = ADC2_Result + ((uint32)(Rd_ADC(E_AHI_ADC_SRC_ADC_2)));
    // On récupère la valeur de l'ADC 3 .
    xx ++;
};
ADC2_Result = ADC2_Result>>3;

```

xx = 0; //on fait la moyenne par 8 des valeurs brutes

```

ADC3_Result = 0;
while(xx<8){
    ADC3_Result = ADC3_Result + ((uint32)(Rd_ADC(E_AHI_ADC_SRC_ADC_3)));
    // On récupère la valeur de l'ADC 3 .
    xx ++;
};
ADC3_Result = ADC3_Result>>3;

```

xx = 0; //on fait la moyenne par 8 des valeurs brutes

```

ADC4_Result = 0;
while(xx<8){
    ADC4_Result = ADC4_Result + ((uint32)(Rd_ADC(E_AHI_ADC_SRC_ADC_4)));
    // On récupère la valeur de l'ADC 3 .
    xx ++;
};
ADC4_Result = ADC4_Result>>3;

```

Même démarche que l'adc 1 mais avec l'adc 2,3 et 4

```

val_bat = (ADC2_Result / 0.868) + 38;
itoa(val_bat,ADC2);

```

```

temperature = 191.53 - (ADC3_Result / 19.05);
itoa(temperature,ADC3);

```

```

temperature = 191.53 - (ADC4_Result / 19.05);
itoa(temperature,ADC4);

```

```

humidite = ((157.2*ADC1_Result)/(val_bat*1.735*0.566))-23.82;

```

```

itoa(humidite,ADC1);

```

```

strcat(str_ADC1,ADC1);
strcat(str_ADC1,";");
strcat(str_ADC1,ADC2);
strcat(str_ADC1,";");
strcat(str_ADC1,ADC3);
strcat(str_ADC1,";");
strcat(str_ADC1,ADC4);
strcat(str_ADC1," X");

```

Mise en forme de la trame des données qui va être reçue par le coordinateur et stockée par le programme Labview.

```

eJenie_SendData(0,str_ADC1,70,TXOPTION_SILENT);
}

```

Envoi des données au coordinateur

```

if(k >= 58)
{
    k = 50;
}

```

On veut 1 envoi par min donc 1 envoi + 8 beacon soit 1 envoi à k=50 et 58-50=8 beacons

```

k++;

```

Incréméntation du compteur pour savoir dans quelle phase on se trouve

```
vAHI_DioSetOutput(0,1);  
vAHI_DioSetPullup(0,1);  
eJenie_Sleep(E_JENIE_SLEEP_OSCON_RAMON);  
break;
```



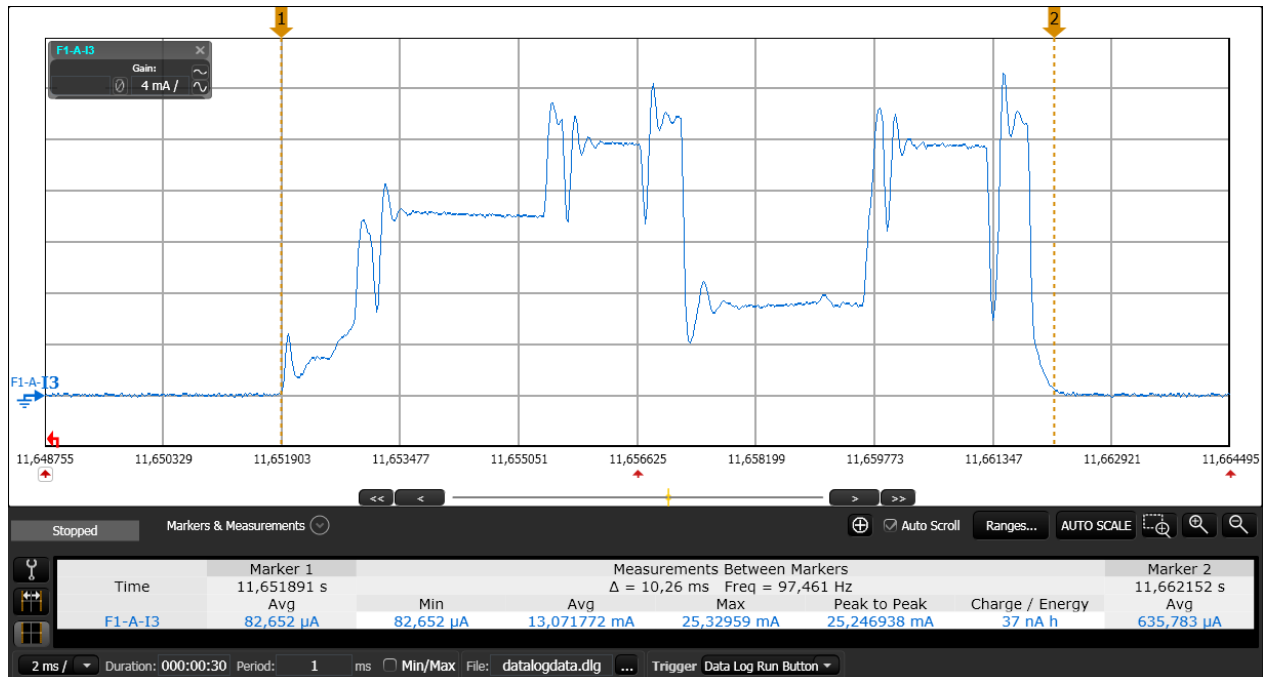
Mise à 0 de la sortie DIO 1 (load switch de la carte « mesure ») puis mise en haute impédance puis mise en sleep du Jennic

Explication du programme

Partie INIT :

Quand un Jennic est connecté celui-ci envoie un message au coordinateur qui est « child joined ». En revanche lorsqu'il perd le réseau il n'envoie rien et donc on ne sait pas quand un ED est connecté ou pas mis à part la communication des données. Or celles-ci peuvent être toute les 15 min par exemple. Ce qu'il fait que la mise en place d'un réseau peut être longue. La partie INIT sert donc à envoyer le numéro du Jennic et le nom de la phase INIT au coordinateur à chaque réveil pendant 50 réveils pour avoir le temps de mettre en place le ED et bien vérifier son fonctionnement. Par exemple pour 6 secondes de mode sleep on a donc 5 min pour mettre en place le ED.

E. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant l'envoi d'un beacon

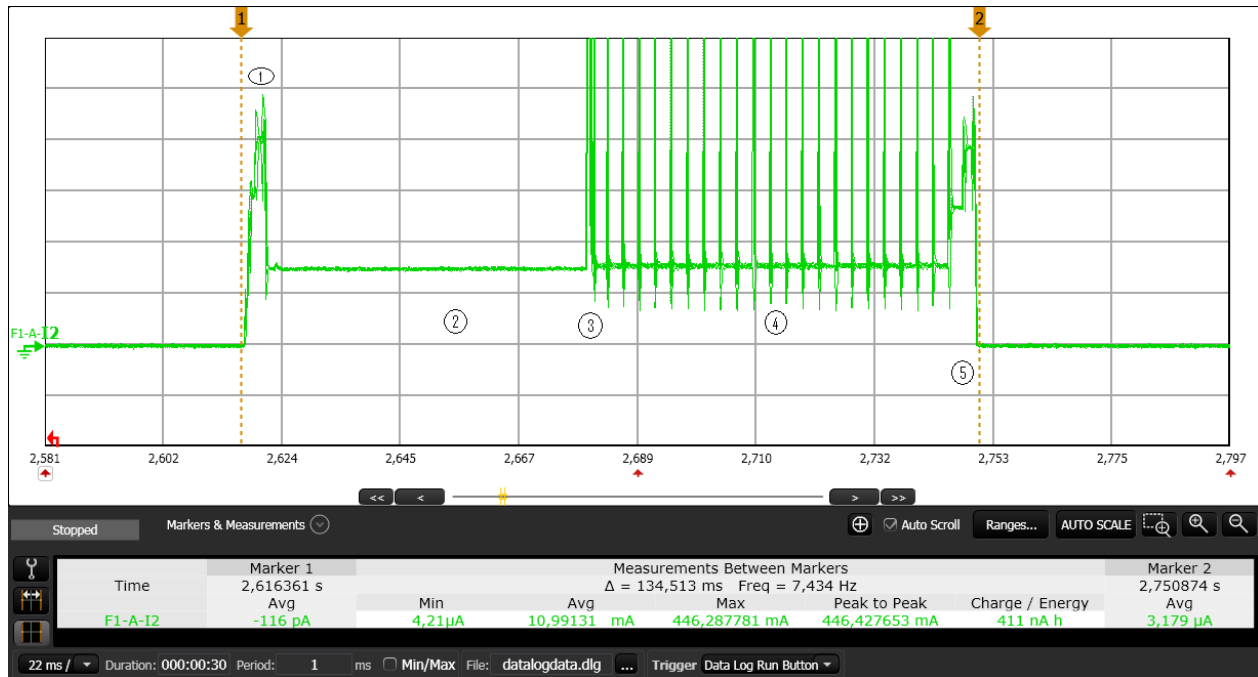


F. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant la recherche du réseau



Echelle : abscisse 20s/div
 Ordonnée 5mA/div

G. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant l'acquisition/envoi d'une donnée



Les différentes étapes sont :

1 : Pic de courant dû au réveil du Jennic et à l'identification du réseau auquel l'end device appartient.

2 : le Jennic est réveillé mais fait une temporisation. Durée de 60ms

3 : le load switch est activé. On trouve un pic de courant aux alentours de 440mA

4 : tempo de 65ms. On voit qu'il y a des pics de courant c'est à cause du convertisseur DC/DC (lt1111) qui permet de générer le +5V. A chaque fois qu'il s'active (tension en dessous de 5V) il y a un pic de courant.

5 : pic de courant dû à la mise en sommeil du Jennic. Communication avec le réseau pour se mettre en sommeil.

H. Screenshot du fichier permettant le dimensionnement des récupérateurs d'énergie

dimensionnement - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2	End device																
3										avec récup							
4	temps beacon (ms)	10				nombre de réveil	9										
5																	
6																	
7	temps d'envoi des données (ms)	20				Capacité de l'accu (mAh)	120			tension batterie (V)	3,6						
8	Courant moyen durant l'envoi (mA)	15															
9						conso (A)	2,94E-05										
10	Courant en mode sleep (µA)	4								PV				TEG			
11																	
12						temps estimé sans récupération (h)	4088,161209			rendement (%)	10			Pneccsaire (W)	2,54E-03		
13	temps en mode sleep (s)	6				jours	170,3400504			irradiance(W/m²)	50			R (Ω)	1		
14	temps entre chaque envoi (mn)	1				mois	5,678001679			temps d'ensoleillement (h)	6			ΔT (°C)	50		
15						année	0,473166807										
16										irradiation (Wh/m²/jour)	300						
17																	
18										Energie nécessaire par jour (Ah)	7,04E-04						
19																	
20																	
21										Surface panneau (cm²)	0,234824399			Surface panneau (cm²)	2,03E+00		
22																	
23																	
24																	
25																	
26						capacité de la batterie (Ah)				avec récup							
27																	
28																	
29	Routeur																
30										tension batterie (V)	3,6						
31	Courant permanent (mA)	44				Capacité de l'accu (Ah)	0,12										
32																	
33										PV							
34						temps estimé sans récupération (h)	2,727272727			rendement (%)	10						
35						jours	0,113636364			irradiance(W/m²)	50						
36						mois	0,003787879			temps d'ensoleillement (h)	6						
37						année	0,000315657										
38										irradiation (Wh/m²/jour)	300						
39																	
40										Energie nécessaire par jour (Ah)	1,06E+00						
41																	
42																	
43										Surface panneau (cm²)	352						
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	

I. Courbe temporelle du courant du Jennic pendant un cycle entier



Ici on peut voir le fonctionnement général des acquisitions et de l'envoi des données. Le mode sleep n'est ici que de 2 secondes avec les étapes d'envoi vues dans l'annexe G. Les pics de courants du à l'activation du boost de tension LT1111 ont été retiré par le retrait de ce composant.

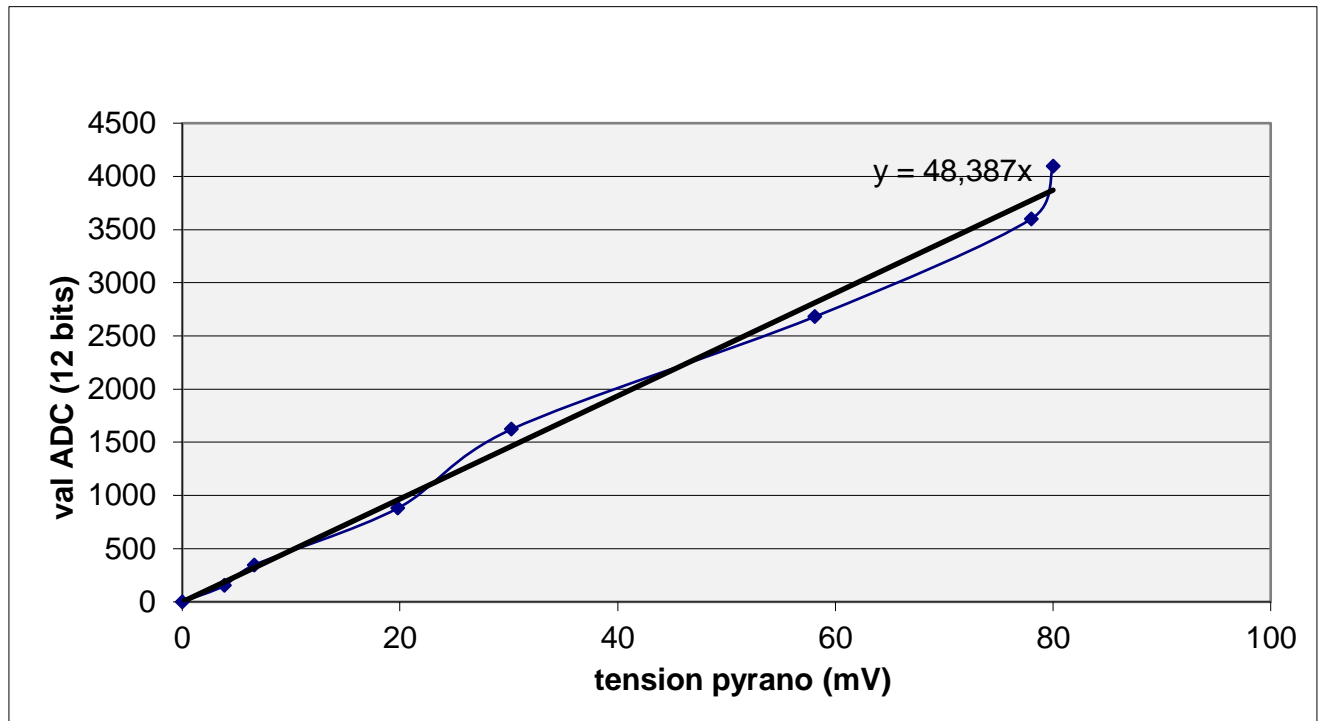
J. Screenshot d'une partie de la datasheet du Jennic

22.3.15 Temperature Sensor

VDD = 2.0 to 3.6V, -40 to +85°C

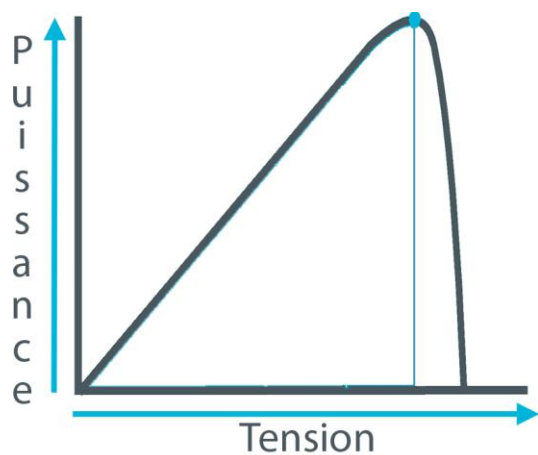
Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Notes
Operating Range	-40	-	85	°C	
Sensor Gain	-1.44	-1.55	-1.66	mV/°C	
Accuracy	-	-	± 10	°C	
Non-linearity	-	-	2.5	°C	
Output Voltage	630		855	mV	Includes absolute variation due to manufacturing & temp
Typical Voltage		745		mV	Typical at 3.0V 25°C
Resolution	0.154	0.182	0.209	°C/LSB	0 to Vref ADC I/P Range

K. Caractérisation du pyranomètre

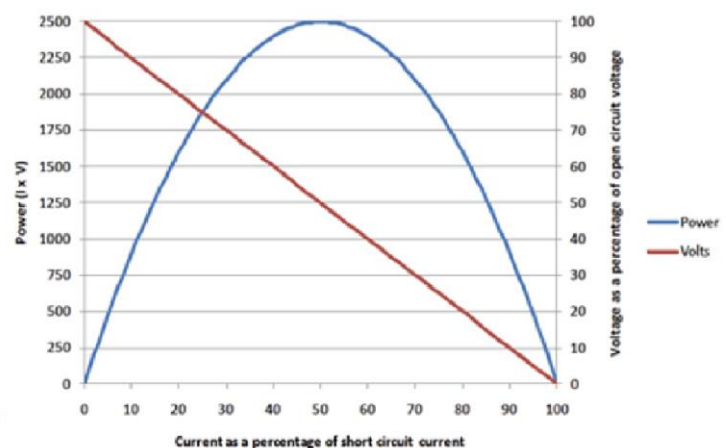


Tension de sortie du pyranomètre (en mV)	0	3,86	6,58	19,8	30,2	58,1	78	80
Valeur en sortie de l'ADC	0	151	345	880	1620	2680	3600	4095

L. MPP des deux récupérateurs d'énergies

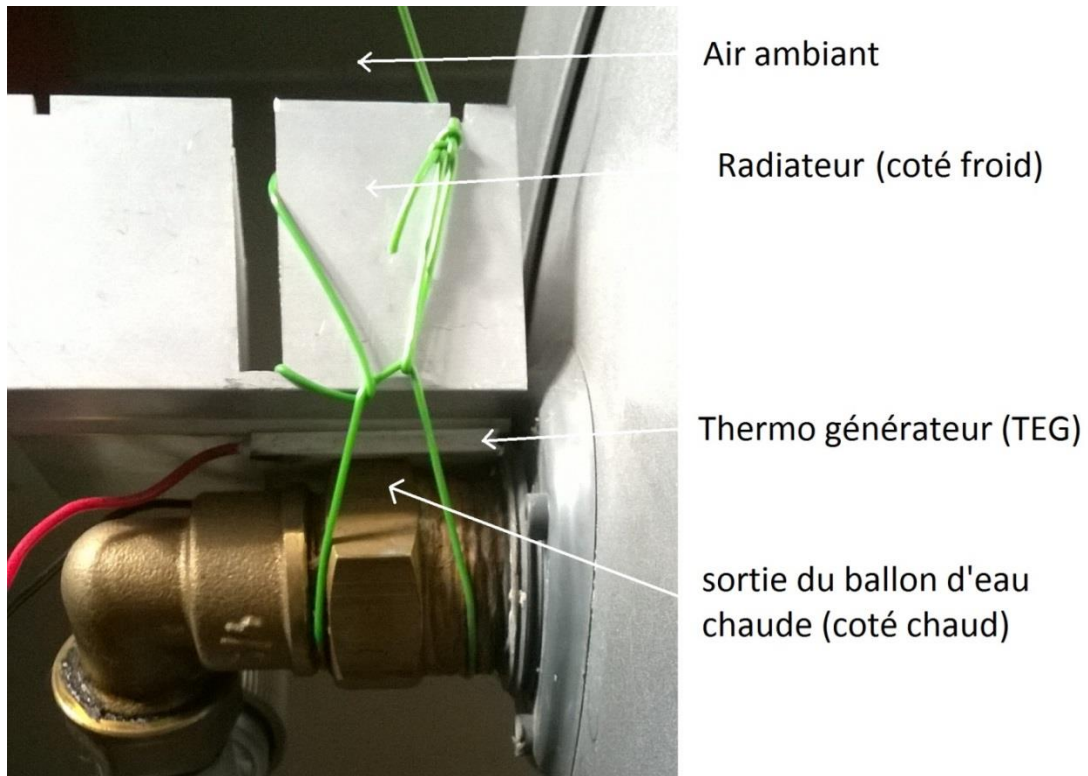


Puissance en fonction de la tension aux borne d'un panneau photovoltaïque

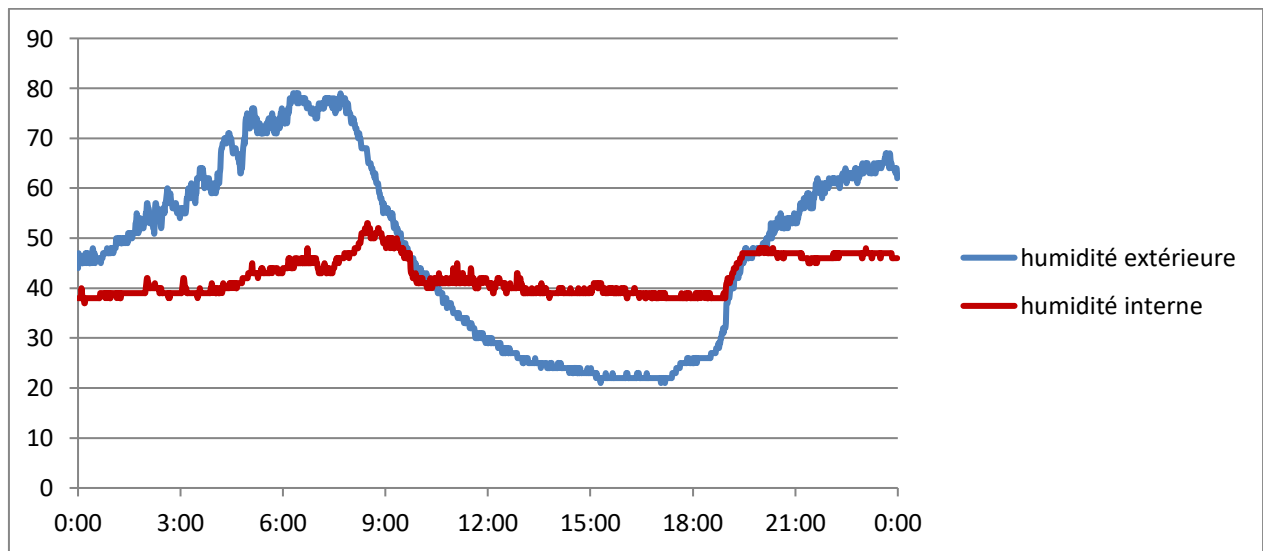


Courbe de la puissance et de la tension aux bornes du TEG en fonction du pourcentage du courant

M. Photo du placement du TEG



N. Récupération des données du capteur d'humidité d'une journée ensoleillée

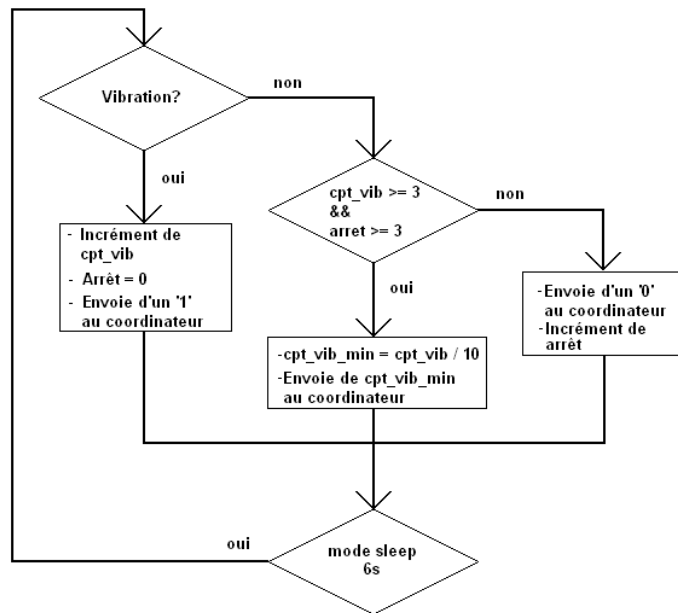


O. Tension de sortie du capteur de vibration (en bas) et sortie du monostable (en haut)

DSO-X 3014A, MY52492512: Thu May 19 13:14:50 2016



P. Diagramme de flux du programme de récupération de la vibration d'un moteur



Q. Explication du programme de récupération de la vibration d'un moteur

```

xx = 0;
ADC4_Result = 0;
while(xx<8)
{
    ADC4_Result = ADC4_Result + ((uint32)(Rd_ADC(E_AHI_ADC_SRC_ADC_4))); // On récupère la valeur de l'ADC 4
    xx ++;
};
ADC4_Result = ADC4_Result>>3; //on fait la moyenne par 8 des valeurs brutes

if (ADC4_Result > 300) // >300 car si il y a une vibration l'ADC 4 sera quasiment saturé donc la valeur de l'adc sera au
{ // dessus de 4000. Et s'il n'y a pas de vibration la valeur sera proche de 0. Donc pour avoir une
    cpt_vib ++; // meilleure précision on prend une valeur arbitraire de 300.
    arret = 0;
    strcat(str_ADC1,"1"); // Si il y a une vibration on incrémente un compteur de vibration et on marque un 1 pour
    strcat(str_ADC1,""); // envoyer au coordinateur afin de savoir que le moteur est en marche.
}
else
{
    if ((cpt_vib >= 3) && (arret >= 3)) // il faut un arrêt d'au moins 3 cycles
    { // pour envoyer le nombre de minutes
        if (raz == 0) // qu'a tourné le moteur
        {
            cpt_vib_min = (cpt_vib / 10); //on multiplie par 6sec (tps du mode sleep)
            // puis on divise par 60 (pour avoir le nbres de minutes)

            raz = 1; //condition pour ne pas effacer les valeurs
        }
        itoa(cpt_vib_min,ADC4); // mise en forme de la trame pour le programme labview
        strcat(str_ADC1,ADC4);
        strcat(str_ADC1,"");
    }
    else
    {
        if (raz == 0)
        {
            strcat(str_ADC1,"0"); // envoi d'un 0 au coordinateur pour dire que le moteur n'est
            strcat(str_ADC1,""); pas en marche
            arret++;
        }
    }
}
}
  
```

R. Outils de mesure



Photo 1 : Pince ampèremétrique



Photo 2 : Analyseur de tension continue N6705B



Photo 3 : Multimètre

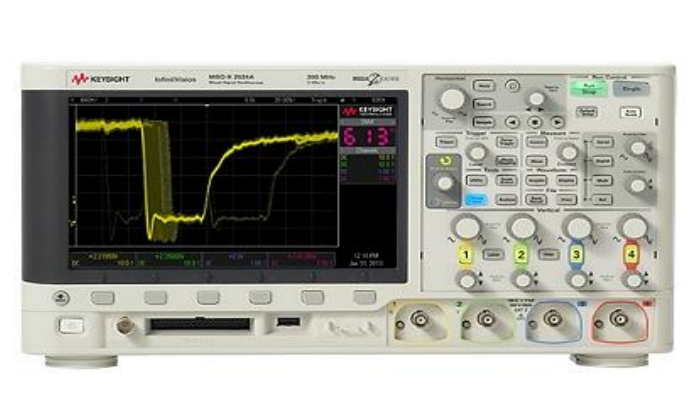


Photo 4 : Oscilloscope DSO-X 3014A

S. Prix des composants utilisés dans le stage

ROUTEUR							
composants	caract	site d'achat	référence fabricant	code commande	quantité	prix/unitée	total
SPV1040		Mouser	SPV1040TTR		1	2,85 €	2,85 €
panneaux solaires	0.8W 4V	Farnell	MC-SP0.8-NF-GCS	1852494	3	7,90 €	23,70 €
Accu	2300mAh, 1,2V AA	Farnell	634998	2075716	3	7,38 €	22,14 €
Jennic	antenne int	Farnell	JN5168-001-M03Z	2341779	1	8,49 €	8,49 €
total routeur							57,18 €

Autres composants utilisés							
BQ25505 (boost récup EN)		Farnell	BQ25504RGTT	2144306	1	5,58 €	5,58 €
TPS2101 (load switch)		Radiospare	TPS2101DBVT	665-8633	5	1,22 €	6,10 €
LM35 (capteur Temp)	de 0 à 100°C	Farnell	LM35DZ/NOPB	1469236	1	1,58 €	1,58 €
LM35 (capteur Temp)	-40 à 110°C	Farnell	LM35CZ/NOPB	1469233	1	4,31 €	4,31 €
capteur de vibration		Radiospare	AU2402-1	618-7535	1	2,16 €	2,16 €
PT1000 (capteur Temp)	-50 à 600°C	Radiospare	NB-PTCO-035	100-5972	1	1,96 €	1,96 €
INA114 (ampli d'instru)		Radiospare	INA114AU	288-755	1	10,33 €	10,33 €
AD623 (ampli d'instru)	alim asymétrique	Radiospare	AD623ARZ	806-5522	1	4,62 €	4,62 €
LM324 (ampli op)		Radiospare	LM324AMX	759-9380	1	2,68 €	2,68 €
MAX735 (génère le -5V)		Radiospare	MAX735CSA+	799-8083	1	4,94 €	4,94 €
LT1111 (boost +5V)		Radiospare	LT1111CS8-5#PBF	761-8046	1	3,50 €	3,50 €
SN74LVC (monostable)		Farnell	SN74LVC1G123DCUR	2109720	1	0,46 €	0,46 €
Thermo générateur	3,78Vdc 8W	Farnell	APH-031-10-13-S	2466914	1	17,33	17,33 €
Splite (pyranomètre)		kippzonen	splite 2	?		?	?
LIR2450 (pile bouton)	3,6V	Farnell	LIR2450	2009025			

Carte mesure du stage							
LMT86 (capteur Temp)		Farnell	LMT86LP	2432144	2	1,21 €	2,42 €
HIH-5031 (capteur d'humidité)		Farnell	HIH-5031-001	17847221	1	12,45 €	12,45 €
Bornier de connexion capteurs		Farnell	282834-3	2396254	3	1,05 €	3,15 €
TPS2101 (load switch)		Radiospare	TPS2101DBVT	665-8633	1	1,22 €	1,22 €
autres composants (résistances support de carte, Capacités , soudures, main d'œuvre etc..)							6 €
TOTAL carte mesure							25,24 €