

# Réalisation d'une alimentation DC 3,3V sans pile avec récupération d'énergie photovoltaïque et stockage sur supercapacités pour l'alimentation d'un capteur sans fil basse consommation

Lionel Séguier, Vincent Boitier, Florian Huet, Jean-Marie Dilhac, Fabrice Caignet

▶ **To cite this version:**

Lionel Séguier, Vincent Boitier, Florian Huet, Jean-Marie Dilhac, Fabrice Caignet. Réalisation d'une alimentation DC 3,3V sans pile avec récupération d'énergie photovoltaïque et stockage sur supercapacités pour l'alimentation d'un capteur sans fil basse consommation. La Revue 3E.I, 2020, 101, pp.13-24. hal-02651454

**HAL Id: hal-02651454**
**https://laas.hal.science/hal-02651454**

Submitted on 29 May 2020

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

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

# Réalisation d'une alimentation DC 3,3V sans pile avec récupération d'énergie photovoltaïque et stockage sur supercapacités pour l'alimentation d'un capteur sans fil basse consommation.

Lionel Seguier, Vincent Boitier, Florian Huet, Jean Marie Dilhac, Fabrice Caignet

vboitier@laas.fr, lseguier@laas.fr
Université de Toulouse, UPS, LAAS, 7 Ave du colonel Roche, F-31400 Toulouse, France

**RESUME :** Cet article développe le dimensionnement, la caractérisation et la mise en fonctionnement d'une alimentation à faible coût ,3,3 V 200 mA, sans pile, destinée à l'alimentation de nœuds de capteurs sans fil à faible consommation sur de très longues durées. Un circuit SPV1050 récupère l'énergie électrique issue d'un panneau photovoltaïque (5x7 cm²), la stocke sur deux supercapacités en série (12,5 F, 5,2 V), puis la met en forme avec un LDO interne afin de fournir la tension demandée. Le problème lié à la durée trop grande du démarrage initial pour les circuits à supercapacités initialement déchargées est solutionné de façon originale grâce à une précharge et à un contrôle de la mise en fonctionnement.

**Mots clés** : photovoltaïque, supercapacité, récupération énergie, energy harvester, WSN.

## 1 INTRODUCTION.

Les industries ou l'agriculture [**KAS**][**KAM**] demandent de plus en plus de capteurs, en particulier pour la surveillance des installations ou pour mettre en place de la maintenance préventive. L'alimentation énergétique de ces capteurs communicants sur des réseaux sans fil à bas coût, basse consommation et bas débit (LORA, Sigfox) nécessite souvent l'usage d'une pile non rechargeable, ce qui oblige à minimiser la consommation pour allonger la durée de vie du produit [**WU**]. Malgré tout, lorsque la consommation du nœud de capteurs est trop importante ou lorsque le remplacement de la pile est trop coûteux ou difficile, il est intéressant de mettre en place un système de récupération d'énergie ambiante (lumière, gradient thermique, vibrations) associé avec une batterie rechargeable et/ou des supercapacités [**YU**] [**TU**].

La densité d'énergie volumique ou massique d'un accumulateur est très supérieure à celle d'une supercapacité (1.1Wh/kg pour une supercapacité PC10 contre 83 Wh/kg pour une pile rechargeable LIR2450 d'un volume similaire) ; Pour autant, comme présenté dans cet article, pour certaines applications, on privilégie l'utilisation de supercapacités en raison de leurs performances en cyclage, pour leur meilleure tenue en température ou pour des raisons de sécurité ou environnementales [**VG**].

Ce travail présente la réalisation d'une alimentation 3,3V 200 mA qui doit alimenter un nœud de capteur sans fil. Le système est sans batterie. Un circuit spécialisé (SPV1050) [**MA**] récupère l'énergie solaire issue d'un panneau solaire (5x7 cm²). Un stockage à base de supercapacités (12,5 F, 5,2 V) pallie à l'intermittence de la ressource solaire et permet de fournir les appels de courant de la charge au démarrage et en fonctionnement.

Une spécificité du circuit électronique de récupération permet de bloquer le démarrage du circuit SPV1050 si les cellules solaires ne voient pas la lumière. Cela permet de ne pas décharger les supercapacités préalablement préchargées, comme avec une pile rechargeable qui ne se vide pas tant que la languette protectrice garde le circuit ouvert. Ainsi, contrairement aux systèmes qui démarrent avec des supercapacités vides et présentent un démarrage initial souvent long [**FI**] et préjudiciable lors du déploiement du système, le démarrage est ici immédiat dès que les cellules solaires sont éclairées même brièvement (lumière naturelle ou LED d'un téléphone) lorsqu'on retire le cache qui recouvre les cellules solaires.

L'article est organisé comme suit : La partie 2 présente la topologie choisie et montre comment choisir rapidement la surface de cellules solaires ainsi que la capacité de stockage en fonction de la ressource lumineuse et de la consommation attendue. Les étages du SPV1050 sont aussi présentés. La partie 3 analyse un démarrage initial classique (phase de « cold start ») et les solutions pour avoir un démarrage rapide lors de la mise en fonctionnement. Cette partie présente aussi l'analyse des performances du buck/boost et du LDO interne au SPV1050. La partie 4 donne des résultats sur site de l'ensemble du dispositif. Enfin, une discussion vient conclure cet article.

## 2 STRUCTURE.

### 2.1 Présentation globale de la structure

La structure de l'alimentation est visible sur la Figure 1. L'énergie des cellules solaires est récupérée par un circuit dédié (SPV1050 [**TI**]) qui gère la récupération optimale de l'énergie (fonction MPPT par fraction de Voc -Maximum Power Point Tracking-) mais aussi le contrôle des niveaux de charge de l'étage de stockage. Le stockage est réalisé avec des supercondensateurs (2 éléments en série) associés avec un circuit d'équilibrage des tensions (ALD910024). Un régulateur linéaire (LDO) interne au SPV1050 permet

de fournir le niveau de tension requis (3,3 V) pour alimenter le nœud de capteur. Ce régulateur est activé ou bloqué par le signal PGood, correspondant à la sortie d'un comparateur à hystérésis connecté à la tension des supercapacités. Le schéma électrique complet est fourni Figure 22.

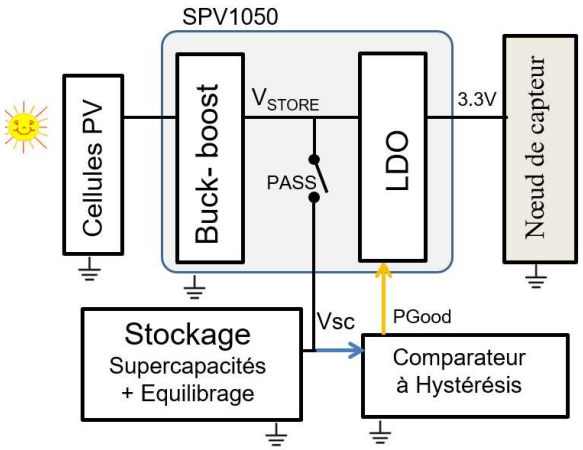



*Figure 1. Structure de l'alimentation*

## 2.2 Nœud de capteur

### 2.2.1 Présentation

Le nœud de capteurs communicant que nous souhaitons alimenter est composé d'un microcontrôleur (référence : ATMEGA328P) type Arduino configuré en basse consommation associé à un module radio (référence : NRF24L01) intégrant tout le nécessaire pour émettre et recevoir des données sur la gamme de fréquence 2.4GHz. Ce module radio utilise le protocole propriétaire "ShockBurst" [**NO**]. La librairie Mysensors [**MY**] permet de contrôler rapidement et facilement des modules NRF24L01. Afin de collecter et d'afficher les données de nos capteurs. Nous utilisons le logiciel de domotique Jeedom [**JE**]. Par la suite nous aurons le choix parmi un panel de capteurs soit analogiques soit numériques, compatibles avec les protocoles supportés par ATMEGA328P. Dans un premier temps un "shield " avec un capteur de température (type DS18b20) est rajouté. L'association Mysensors et Jeedom permet de mettre en place facilement les mesures, le stockage et l'affichage de ces mesures.

### 2.2.2 Consommation

Bien souvent, l'ajout d'un système de récupération vient après une conception initiale du nœud de capteur utilisant une alimentation par pile Lithium, ce qui conduit à une tension d'alimentation de 3 V ou 3,3 V.

L'analyse de la consommation, réalisée avec un DC power analyser N6705B d'Agilent, est résumée dans le tableau 1 ci-dessous. Les formes du courant lors du démarrage initial puis lors des phases de mesure et transmission sont précisées sur la Figure 2.

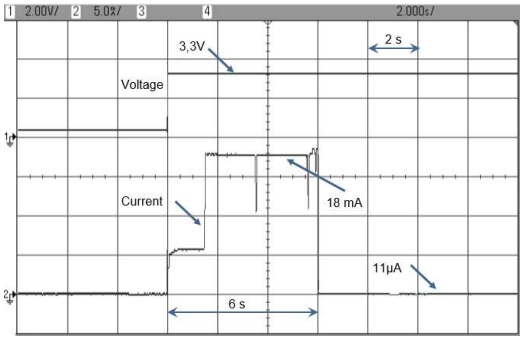
*Tableau 1. Consommation du nœud de capteur*

| Voltage (V) | 3.3 |
|---|---|
| **Startup** | |
| E_startup (mJ) | 272 |
| t_startup (s) | 6.0 |
| **Measure and communication** | |
| E_meas (mJ) | 6,5 |
| t_meas (ms) | 148 |
| **Sleep mode** | |
| Sleep current (µA) | 11 |

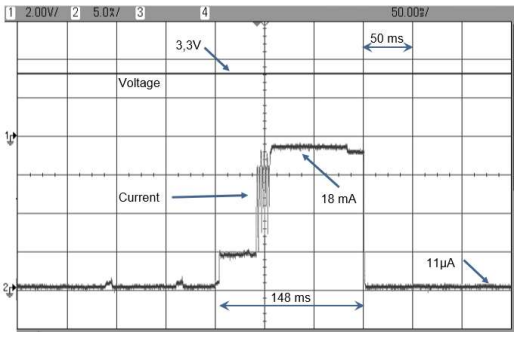
Le démarrage initial du nœud de capteur est souvent énergivore (le temps que le nœud de capteur se connecte avec le réseau) et le courant maximum à fournir par l'alimentation a souvent lieu lors du premier démarrage (pic de courant si l'entrée du nœud de capteur est capacitive).

Une fois le démarrage initial terminé, le cycle de fonctionnement se décompose généralement en deux phases : une phase de veille avec une très faible consommation, et une phase active durant laquelle sont effectués les mesures, le traitement des données et la transmission radio (pic de courant éventuel lors de cette phase en fonction du mode de transmission).

Il importe donc de bien analyser la consommation pour dimensionner le système de stockage. Il doit rester encore assez d'énergie dans les supercapacités après le démarrage initial, les supercapacités doivent être capable de fournir les pics de courant demandés et le stockage doit permettre d'avoir l'autonomie requise.




(a)




(b)

*Figure 2 : Démarrage initial (a) et phase de mesure et communication (b) du nœud de capteur.*

La consommation initiale au démarrage du nœud est notée $E_{STARTUP}$. Les grandeurs indicées « SLEEP » correspondent à la phase de veille, les grandeurs indicées « MEAS » à la phase de mesure et communication.

La consommation par cycle est donnée par :

$$E_{CYCLE} = E_{SLEEP} + E_{MEAS} = (V_{ALIM}.I_{SLEEP}).T_{SLEEP} + E_{MEAS}$$

avec

$$T_{SLEEP} = T_{CYCLE} - T_{MEAS} \approx T_{CYCLE}$$

On peut alors facilement déterminer la puissance moyenne consommée en fonction de la durée du cycle de mesure. Pour $T_{CYCLE}$ = 5 min, on trouve $E_{CYCLE}$ = 17 mJ et $P_{CYCLE}$ = 58 µW, soit aussi un courant moyen consommé $<I_{LOAD}>$ = 18 µA. Si on réduit la cadence des mesures ( Figure 3), on constate que la puissance moyenne consommée tend vers une limite de 36 µW correspondant à la puissance consommée en veille.

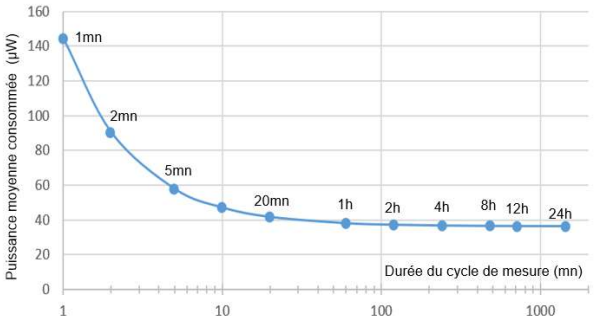



*Figure 3. Puissance moyenne consommée par le nœud de capteurs vs la cadence de mesure.*

## 2.3 Energie photovoltaïque

La consommation d'un nœud de capteur est facilement mesurable. Il est plus difficile de connaitre avant installation sur un site donné le potentiel photovoltaïque, néanmoins on peut en avoir une estimation avec des bases de données [**NA**] [**CA**] [**PV**] et/ou des mesures directes sur site.

### 2.3.1 Ressource lumineuse

En intérieur, l'énergie lumineuse est caractérisée par l'éclairement E (lux), en extérieur, on utilise plutôt l'irradiance G (W/m²). Randall [**RAN**] a proposé une conversion simplifiée entre lux et irradiance :

$$1\ lx = 1/120\ W/m^2$$

La littérature fournit quelques informations pour estimer dans une première approche le gisement lumineux en fonction de la localisation des cellules solaires. Le tableau 2 donne quelques valeurs typiques.

*Tableau 2 Energie disponible pour la récupération d'énergie d'après [GW].*

| Cas | Intérieur | | | | Extérieur | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | éclairage tamisé | éclairage couloir | éclairage de travail | incan-descence | temps couvert | Très ensoleillé |
| E (lux) | 80 | 150 | 740 | 1200 | 3000 | 100000 |
| **G (W/m²)** | 0.67 | 1.3 | 6.2 | 10 | 25 | 1000 |

Ces valeurs sont à considérer avec prudence en particulier pour une localisation en intérieur [**MAT**]. Dans tous les cas, on cherchera à maximiser l'angle solide vu par le panneau solaire tourné vers des fenêtres ou à positionner le panneau solaire vers une source de lumière artificielle. Pour un positionnement extérieur, il importe aussi d'estimer l'importance des masques qui vont occulter le rayonnement direct mais aussi le rayonnement diffus. En extérieur, les bases de données fournissent généralement l'irradiation journalière à l'horizontale en kWh/m²/jour. Ces valeurs sont à compléter par quelques mesures in situ. Pour une pré-étude Waltisperger [**GW**] propose "l'hypothèse pessimiste suivante (utilisée actuellement dans l'industrie), […] le capteur photovoltaïque est positionné au nord et soumis à un temps pluvieux d'hiver pendant 6 h par jour, ce qui représente une densité de puissance solaire disponible de 20 W/m²." 20 W/m² correspond effectivement à une valeur typique observée en décembre par temps pluvieux à Toulouse pour une mesure à l'horizontal.

### 2.3.2 Panneau photovoltaïque

*Identification de la surface nécessaire*

Pour dimensionner rapidement la surface photovoltaïque $S$ quelques relations simples sont utilisées. On note $N$ le nombre de cycles par heures, $\eta_{PV}$ le rendement des cellules solaires, $\eta_{DC/DC}$ le rendement du convertisseur buck/boost du SPV1050 , $\eta_{LDO}$ le rendement de son LDO interne. On suppose constant le rendement charge/décharge des supercapacités, noté $\eta_{SC}$.

Pour trouver la surface photovoltaïque $S$, on exprime que l'énergie récupérable par jour exprimée en Joule doit être supérieure à l'énergie journalière consommée. Ainsi pour un système placé à l'extérieur qui voit par jour une irradiance moyenne $G$ (W/m²) pendant une durée $D$ (h), l'énergie récupérable en J/m²/jour vaut :

$$E_{SUN_DAY} = G.(D.3600).$$

Soit pour une surface $S$ :

$$(E_{SUN_DAY}.S).\eta_{PV}.\eta_{DC/DC}.\eta_{SC}.\eta_{LDO} \geq E_{CONSO_DAY}$$

avec

$$E_{CONSO_DAY} = 24.N.E_{CYCLE}$$

Pour un pré dimensionnement, on prendra $\eta_{PV}$ = 5% (silicium amorphe), $\eta_{DC/DC}$ = 75%.

$\eta_{LDO}$ = 75% et $\eta_{SC}$ = 80%. Avec une cadence de mesure $T_{CYCLE}$ = 5mn, pour un système placé en extérieur avec G = 20 W/m² durant $D$ = 6 h, on trouve une surface minimale $S$ = 5 cm², avec la même cadence, en indoor avec un gisement de 300 lux, 7 h par jour (éclairage bureau), on détermine une surface $S$ de 35 cm².

*Caractéristique du panneau photovoltaïque sélectionné*

Compte tenu de la gamme de tension du circuit d'extraction (SPV1050), nous avons retenu un module PV amorphe destiné à une utilisation en extérieur et intérieur référence Sanyo AM5706CAR (Figure 4) dont les caractéristiques pour un éclairement de 50klux sont : S : 5x7=35 cm², Voc 6V, Isc 22.6 mA, Vmp-Imp-Pmp : 4.6 V-19 mA-88 mW @ 50 klux / 4.6 V-40 mA-186 mW @ 100 mW/cm² = 1 sun

Nos mesures (Figure 5) ont donné : Voc 5,3 V, Isc 3,1 mA, Vmp-Imp-Pmp 4.3 V - 2,6 mA - 11,2 mW @ 6000lux

Dans tous les cas on trouve un rendement entre 5 et 6% pour ce panneau.

On trouve Vopt/Voc = 80 % ± 4%

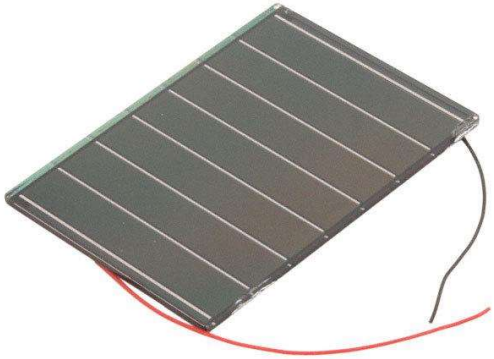


*Figure 4. Module PV amorphe ref sanyo AM-5706car*

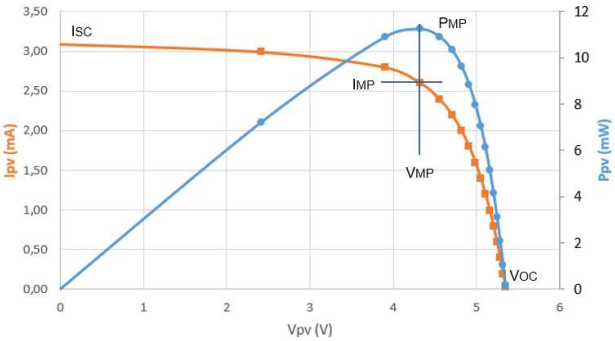



*Figure 5. Caractérisation du AM-5706 @6000 lux*

## 2.4 Stockage de l'énergie.

Le choix des supercapacités est toujours à mettre en concurrence avec le choix d'une pile rechargeable. Pour un stockage amené à rester longtemps en place et à cycler beaucoup ou lorsque les contraintes de température sont élevées, les supercapacités deviennent intéressantes.

### 2.4.1 Supercapacités

*Caractéristiques*

Le modèle ESHSR-0025C0-002R7 de Nesscap a été choisi. Ces caractéristiques principales sont : 25 F, 2,7 V, ESR 21 mΩ, -40 °C, 65 °C, 500,000 cycles, 1000 heures à 85 °C.

Pour ce projet nous avons choisi de stocker l'énergie avec une tension maximale de 5,2 V. Il y a donc 2 supercapacités en série. Le niveau maximal de charge reste en dessous du maximum atteignable qui est de 5.4 V pour les capas et de 5,3 V pour le SPV1050. Ceci donne une plage de sécurité à l'ensemble.

On note $C_{EQ}$ la capacité équivalente de deux supercapacités en série. $C_{EQ} = C/2$ = 12,5 F.

L'énergie du pack est donnée par la relation :

$$E_{CAP} = \frac{1}{2} C_{EQ} \cdot V_{SC}^2$$

*Autodécharge*

L'autodécharge des supercapacités est un point important en particulier pour un système qui doit rester chargé longtemps avant utilisation ou d'être utilisé comme source d'énergie avec un niveau de recharge potentielle faible. Pour évaluer l'autodécharge, nous avons préchargé durant 12 heures à tension constante le pack de 2 supercapacités placés dans une enceinte thermostatée puis nous avons mesuré l'évolution de la tension aux bornes du pack en circuit ouvert avec un appareil dédié (Biologic BCS810). Les résultats sont donnés dans la Figure 6.

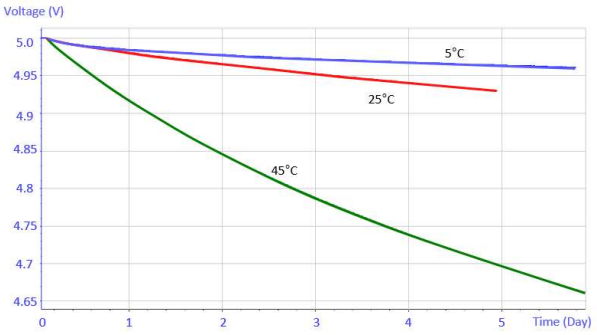



*Figure 6. Influence de la température sur l'autodécharge.*

A partir de ces mesures, on constate que la perte relative d'énergie au bout de 5 jours à 5 °C (respectivement 25 °C et 45 °C) est de 1 % (resp. 3 % et 12 %). Elle augmente avec la température mais reste acceptable sur une large plage de température (3% @ 45°C à la fin du premier jour).

Le courant d'autodécharge peut être estimé avec la pente de la courbe par la relation suivante :

$$I_{AUTODECHARG} = C_{EQ} \cdot \frac{\Delta V_{SC}}{\Delta t}$$

Pour Δt = 1 jour (de t = 0 à t = 1), on trouve $I_{AUTODECHARGE}$ = 11 µA @ 45 °C et *3* µA @ 25 °C mais

une part de ce courant est vraisemblablement due à la charge des branches lentes des supercapacités [**Zh**].

Pour $\Delta t = 2$ jours (de $t = 3$ à $t = 5$), on trouve $I_{AUTODECHARGE}$ = 6 µA @ 45 °C et *2* µA @ 25°C

### 2.4.2 Circuit d'équilibrage

*Présentation du fonctionnement*

Pour des petites supercapacités (<10 F par élément), l'expérience nous a montré qu'il n'est pas nécessaire d'adjoindre un circuit d'équilibrage si les supercapacités sont issues d'un même lot et ont la même valeur initiale de capacité (comme le courant d'autodécharge varie comme la tension, cela crée un équilibrage naturel). Toutefois, pour un circuit amené à avoir une durée de vie de plusieurs années, il est préférable d'adjoindre un circuit d'équilibrage [**DI**]. Le circuit utilisé est un ALD9100xx (xx désignant la tension nominale, on prendra xx=24 : 2,4 V). Le principe de fonctionnement est le suivant : Ce circuit inclut deux MOSFETs, le courant de drain augmente avec la tension aux bornes du MOSFETqui se comporte comme une résistance variable. La variation est exponentielle, ce qui permet d'avoir un courant consommé très faible en dessous de la tension d'utilisation, mais important et favorisant la décharge de la supercapacité pour des tensions supérieures à la tension nominale d'utilisation.

Le câblage est donné sur la Figure 7 (C1 et C2 sont les capacités que l'on souhaite équilibrer).

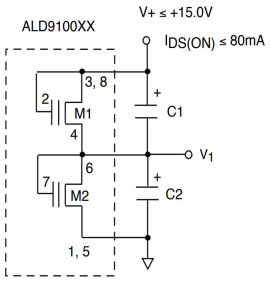



*Figure 7 : Schéma interne du circuit ALD9100xx*

*Mesures du courant d'équilibrage*

La Figure 8 décrit l'évolution du courant dissipé par la puce ALD910024 en fonction de la tension aux bornes d'une supercapacité. La tension totale est limitée à 5,2 V dans l'étude, donc à 2,6 V par supercapacité.

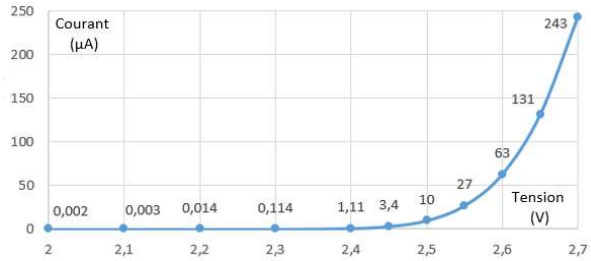



*Figure 8 : Mesures du courant dissipé par la puce ALD910024 vs la tension aux bornes d'une supercapacité*

En fonctionnement normal le courant de fuite dû à l'équilibrage reste inférieur à 1 µA. S'il y avait un déséquilibre de tension entre les 2 supercapacités en série et que l'une atteignait sa tension maximale à savoir 2,7 V alors elle présenterait un courant de fuite de 240 µA contre 10 µA ou moins pour l'autre supercapacité qui aurait une tension inférieure ou égale à 2,5 V ce qui permettrait de tendre vers un équilibrage des 2 tensions.

### 2.4.3 Dimensionnement des supercapacités

Pour dimensionner la capacité des batteries $C_{EQ}$, quelques relations simples sont utilisées. Dans cette étape de pré-dimensionnement, certains phénomènes sont négligés (autodécharge des supercap, conso équilibrage, …) ou simplifiés ( valeur du rendement moyennée alors qu'elle dépend de la tension des supercapacités et du courant débité).

Pour les supercapacités, la capacité équivalente $C_{EQ}$ (F) est déterminée en fonction de l'autonomie désirée -notée *Aut* (jour)-. La tension des supercapacités évolue sur une plage utile comprise entre $V_{SC_MAX}$ et $V_{SC_MIN}$. Pour avoir l'autonomie souhaitée, l'énergie utilisable dans les supercapacités doit être supérieure à l'énergie consommée durant la phase sans recharge aucune, ce qui donne en négligeant l'autodécharge, les pertes dans la résistance série des capas, les pertes dues à l'équilibrage et en supposant $\eta_{LDO}$ constant:

$$\frac{1}{2}.C_{EQ}(V_{SC_MAX}^2 - V_{SC_MIN}^2).\eta_{LDO} > Aut.(N.E_{CYCLE})$$

Avec une cadence de mesure $T_{CYCLE}$ = 5 min et *Aut* = 15 jours d'autonomie, $V_{SC_MAX}$ = 5,3 V, $V_{SC_MIN}$ = 3,3 V, $\eta_{LDO}$ = 75 %, on trouve $C_{EQ}$ = 12,5 F, 2 supercapacités de valeur C = 25 F devrait convenir. Nous avons donc choisi ces valeurs pour les supercapacités utilisées.

## 2.5 Circuit SPV1050

### 2.5.1 Extrait de la documentation technique

Différents CI du commerce récupèrent l'énergie des cellules solaires et gèrent à la fois la fonction MPPT et la charge de l'élément de stockage (batterie rechargeable ou supercondensateur). Les références SPV1050, BQ25504, BQ25570, MAX17710, ADP5090, AEM10941, … sont disponibles sur le marché. Nous avons choisi d'utiliser sur ce projet le SVP1050 [**TI**].

Il intègre les fonctions suivantes :

- Extraction du maximum de la puissance solaire avec une loi de commande MPPT par fraction de Voc (réglable par jeu de résistance)
- Gestion de la charge de l'élément de stockage (batterie ou supercapacités) avec tension de fin de charge et de décharge (réglable par jeux de résistance)

- 2x LDO indépendants (1.8 V, 3.3 V, Imax 200 mA) pilotables respectivement via une broche de contrôle Enable.

Ces caractéristiques principales sont les suivantes : Gamme de tension côté solaire très large : 75 mV à 18 V, avec pour le démarrage en mode buck/boost une tension minimale de 2.6 V et un courant minimum de 5 µA. Pour l'étage de stockage, un courant de charge ≤ 70 mA, une tension comprise entre 2.2 V et 5.3 V,

Deux indicateurs de charge : BATT_CHG : indique que la batterie est en charge, BATT_CONN : indique que le transistor entre batterie et STORE est fermé

Consommation (datasheet) :

- Courant de shutdown (avant le premier démarrage ou batterie déchargée V<Vuv ~1 nA
- Courant de standby (LDO_EN inactif) ~ 1 µA
- Courant normal sans charge ~2 µA avec 1LDO activé / ~3 µA avec les 2 LDO activés.

### 2.5.2 Transistor PASS

Sur la Figure 1 et 9, on note un interrupteur statique (transistor noté PASS) intégré au SPV1050. Il permet la déconnexion de l'étage de stockage (supercapacités ou batteries) pour minimiser la consommation lorsque la tension du stockage est trop faible et pour protéger la batterie contre les décharges profondes.

Avant le premier démarrage, PASS est ouvert. Il se ferme lorsque la tension $V_{STORE}$ augmente assez pour atteindre le seuil $V_{EOC}$. Il restera alors toujours fermé, sauf si $V_{STORE}$ diminue et passe sous le seuil $V_{UVP}$.

Les seuils UVP et EOC sont réglables par un jeu de résistance (R4, R5, R6) que l'on fixe en respectant les relations données par le constructeur.

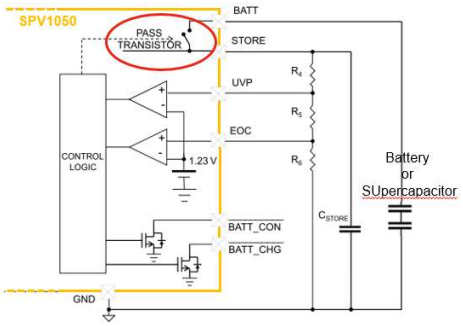



*Figure 9. Gestion des seuils de l'étage de charge (batterie ou supercapacité).*

### 2.5.3 Convertisseur abaisseur/élévateur

Un convertisseur DC/DC (boost ou buck/boost) est placé entre le panneau solaire et l'étage de stockage. Nous avons choisi la configuration buck/boost. Lorsque l'on connecte le panneau solaire, tant que la tension $V_{STORE} < 2.6$ V, le panneau solaire et la pin STORE sont connectées en interne. Cette phase n'optimise pas la récupération d'énergie et peut prendre un temps très long (la précharge des supercapacités évite ce problème). Pour $V_{STORE}$ comprise entre 2,6 V et $V_{EOC}$, le convertisseur fonctionne en mode recherche du maximum de puissance (mode MPPT). C'est une MPPT dite « fraction de Voc ». Toute les 16s, durant 400 ms, le panneau est en circuit ouvert, le SPV1050 récupère la tension de circuit ouvert $V_{OC}$. Le reste du temps, le DC/DC fonctionne en régulant la tension du panneau à une tension proche de la consigne $V_{MPP}$ égale à environ 80% de cette tension $V_{OC}$. On a alors avec k= 0,8:

$$V_{PV} \approx V_{MPP} \approx k.V_{OC}$$

Toutefois, si l'étage de stockage est plein, c'est-à-dire lorsque $V_{STORE}$ atteint $V_{EOC}$, et tant que $V_{STORE} > V_{EOC} - \Delta V$, avec $\Delta V = 50$ mV, le convertisseur DC-DC s'arrête pour éviter la surcharge.

### 2.5.4 LDO et comparateur à hystérésis externe

Le SPV1050 intègre un étage LDO pour alimenter la sortie avec le niveau de tension requis (3.3 V). Ce LDO est piloté par une entrée logique de commande (LDO_EN) reliée à la sortie du comparateur à hystérésis. La tension mesurée par le comparateur est la tension $V_{SC}$. On note $V_H$ et $V_L$ les seuils haut et bas du comparateur. Ce comparateur, à très faible consommation, est autoalimenté sur le stockage Vstore (Figure 10). On notera que l'alimentation du comparateur est prise sur $V_{STORE}$ et non directement sur $V_{SC}$, car la documentation du SPV1050 précise que la tension de l'entrée enable du LDO ne doit pas être supérieur à $V_{STORE}$.

Lors du démarrage initial, la charge peut puiser une quantité d'énergie importante dans les supercapacités (en particulier pour initier la connection au réseau), ce qui va entrainer une baisse de la tension de l'étage de stockage. A la fin du démarrage, le niveau du stockage doit être toujours être au-dessus du niveau minimal acceptable par le LDO pour un bon fonctionnement. Cela permet de déterminer le niveau $V_H$ minimal. Avec une marge de sécurité importante on a pris $V_H = 4{,}3$ V. $V_L$ est fixé un peu en dessous de la tension de sortie du LDO, soit 3,2 V. Les résistances du comparateur sont choisies pour fixer les seuils de commutation $V_H$ et $V_L$ sachant que [**FH**]

$$V_{IN+}.(1/R_8 + 1/R_7 + 1/R_9) = (V_{SC}/R_8 + V_{OUT}/R_9)$$

Comme la sortie du comparateur $V_{OUT}$ = 0V ou $V_{OUT} = V_{STORE} \approx V_{SC}$ et comme $V_{IN-} = V_{REF} = 1{,}18$ V, on a :

$$V_{REF}.(1/R_8 + 1/R_7 + 1/R_9) = (V_H/R_8 + 0/R_9)$$

et

$$V_{REF}.(1/R_8 + 1/R_7 + 1/R_9) = (V_L/R_8 + V_L/R_9)$$

soit :

$$V_H = V_{REF}.R_8.(1/R_8 + 1/R_7 + 1/R_9)$$

et

$$V_L = V_H/(1 + R_8/R_9)$$

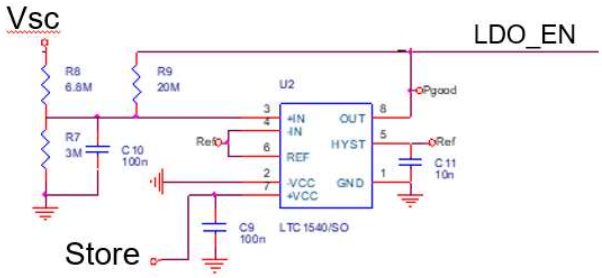



*Figure 10. Comparateur à hystérésis autoalimenté.*

# 3 TESTS ET VALIDATIONS

## 3.1 Circuit réalisé

La Figure 22 montre le schéma électrique de l'ensemble du dispositif. L'ensemble est intégré sur la carte présentée Figure 11. La taille de la carte est de 40x47 mm². L'ensemble est placé dans un boitier sur lequel est collé le panneau solaire. Le prix des composants électroniques et du panneau solaire est voisin de 15 € pour l'ensemble de cette carte (pour une série de 1000).




*Figure 11. Carte électronique réalisée.*

## 3.2 Démarrage initial, « coldstart »

La Figure 12 présente le démarrage initial. Les supercapacités sont initialement déchargées. Dès que la lumière est là (éclairage à LED constant, 6100 lux), la charge commence. La capacité $C_{STORE}$ se charge, le transistor PASS se ferme, $C_{STORE}$ se vide dans l'étage de stockage, PASS se referme, etc… La charge se fait lentement tant que Vsc< 2,2 V car le buck/boost n'est pas encore pleinement opérationnel. Puis, le buck-boost se met en fonctionnement avec une commande MPPT, la charge est beaucoup plus rapide. Lorsque Vsc atteint 4,3 V, le LDO est activé et délivre la tension 3,3 V souhaitée à la charge. Sur cette figure, les données affichées sont moyennées à la seconde.

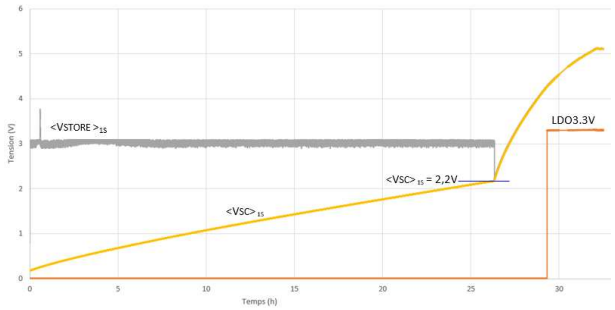



*Figure 12. Démarrage avec les supercapacités initialement déchargées, « Cold start »*

Pour pallier à ce défaut d'un « cold start » trop lent [**VB**], une solution est proposée dans la partie suivante.

## 3.3 Démarrage instantané

Pour que le système démarre instantanément, il est nécessaire de précharger les supercapacités. Cette dernière étant réalisée plusieurs heures ou plusieurs jours avant la mise en service, les supercapacités doivent rester suffisamment chargées pour que le démarrage puisse s'effectuer. Cela implique d'avoir des supercapacités avec peu d'autodécharge, un équilibrage peu consommateur et de minimiser la consommation du SPV1050 avant le démarrage. Les deux premières conditions sont réalisées ($i_{AUTODECH}$ < 2 µA@25°C, $i_{EQU}$ < 1 µA si $V_{SC}$ < 2,4 V), la troisième condition est réalisée en suivant la procédure décrite ci-dessous ($i_{SPV}$ < 1 µA).

### 3.3.1 Procédure de précharge

Avant de précharger les supercapacités, il est important que le transistor PASS soit ouvert. Pour cela, il faut mettre le panneau solaire dans le noir, puis décharger les supercapacités en connectant à leurs bornes une résistance jusqu'à ce que $V_{SC}$ <$V_{UVP}$. Le transistor PASS s'ouvre alors. On enlève la résistance, Les supercapacités sont alors complètement isolées. La consommation du SPV devient alors très faible (iSPV<1 µA, cf Figure 13) tant que PASS reste ouvert.

On peut alors précharger les supercapacités à 5,2 V en connectant directement aux bornes des supercapapacités un générateur préalablement réglé à 5,2 V et limité en courant à 500 mA. Une fois la précharge terminée, on enlève l'alimentation. Les supercapacités sont alors complètement chargées mais sans mise en route du nœud de capteurs, car PASS est ouvert.

Elles sont chargées et se déchargent très lentement.

Pour réaliser un démarrage au moment désiré, il suffit d'éclairer le panneau solaire. Le SPV1050 se réveille, $V_{STORE}$ peut remonter au-dessus de $V_{EOC}$, PASS se ferme et le LDO est activé. Nous avons pu vérifier que la lumière (LED) d'un téléphone placé devant les cellules solaires permettait le démarrage du circuit.

### 3.3.2 Consommation avant activation.

Lorsque PASS est ouvert, la consommation cumulée du circuit SPV1050 et du comparateur à hystérésis est < 0,5 µA. Les mesures faites donnent la modélisation suivante:

$$I_{SPV+COMP} = 0{,}10.1e^{-6}.V_{SC}$$

avec $I_{SPV+COMP}$ en A et $V_{SC}$ en V

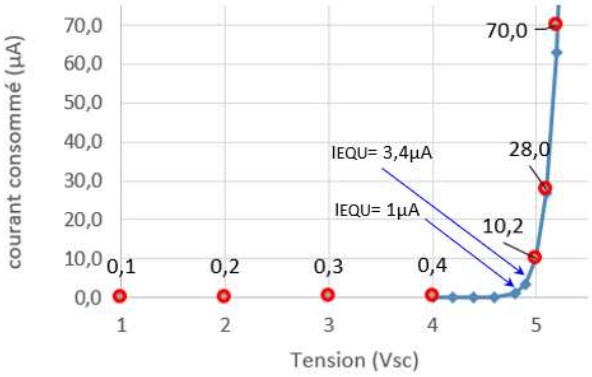



*Figure 13. Somme des courants équilibrage, SPV1050 et comparateur lorsque PASS est ouvert,.*

Les mesures faites (points rouges) lorsque PASS est ouvert, obtenues en remplaçant les supercapacités par une source de tension et en mesurant le courant délivrée, sont données sur la Figure 13. Le courant correspond à la somme du courant d'équilibrage et du courant consommé dans le SPV1050 et dans le comparateur. En bleu, la courbe donne seulement le courant d'équilibrage préalablement mesuré pour une seule supercapacité (obtenue à partir de la Figure 8 en multipliant la tension par 2). Les mesures sont bien concordantes.

### 3.3.3 Autonomie avant activation du circuit.

Pour calculer l'autonomie probable, il faut estimer le courant équivalent d'autodécharge, le courant d'équilibrage et le courant absorbé par le SPV1050 et le comparateur. On néglige les pertes dans les ESR et $R_{DS_ON}$ du transistor PASS.

L'autodécharge des supercapacités est complexe à modéliser, on la prendra à 2 µA, valeur raisonnable compte tenu de l'allure linéaire de la courbe d'autodécharge (cf Figure 6) au bout de quelques jours à 25 °C

Pour le courant allant dans le SPV1050 et le comparateur le modèle linéaire est déjà donné au-dessus.

Pour le courant d'équilibrage, on procède comme suit :

- on le prendra nul si Vsc<4,6 V
- un modèle d'ordre 1 convient pour $V_{SC}$ entre 4,6 et 4,8 V. (majoration du courant perdu)

$$I_{EQ} = (4{,}98.V_{SC} - 22{,}89).1e^{-6}$$

- un modèle d'ordre 3 convient parfaitement pour $V_{SC}$ entre 4,8 et 5,4 V avec :

$$I_{EQ} = (1702{,}50.V_{SC}^3 - 24984.V_{SC}^2 + 122246.V_{SC} - 199431).1e^{-6}$$

En partant de $V_{SC}(0) = 5{,}3$ V, avec un pas $\Delta t$ de 1 h, on calcule de façon itérative l'évolution de la tension $V_{SC}$ en utilisant la relation suivante et en exprimant $V_{SC}(n+1)$ en fonction des autres paramètres:

$$I_{AUTODECH}(n) + I_{EQU}(n) + I_{SPV+COMP}(n) = C_{EQ}.\frac{\Delta V_{SC}}{\Delta t} = C_{EQ}.\frac{V_{SC}(n+1) - V_{SC}(n)}{\Delta t}$$

La Figure 14 montre comme prévu que la tension diminue rapidement tant que $V_{SC} > 4{,}8$ V, ceci est dû à la dissipation d'énergie liée à l'équilibrage des supercapacités. Puis c'est l'autodécharge qui est prépondérante. Ainsi, avec une précharge des supercapacités plus de 10 jours avant , on peut les utiliser et avoir un démarrage immédiat (car $V_{SC} > 4{,}3$ V), ce qui lève bien le problème du démarrage initial présenté précédemment.




*Figure 14. Modélisation du courant de décharge et de la tension $V_{SC}$, PASS ouvert.*

La série de mesures suivante (Figure 15) vient confirmer les résultats précédents. Cette figure montre l'évolution de la tension mesurée journalièrement au multimètre (points et courbe orange) aux bornes des 2 supercapacités déconnectées du reste du montage (PASS ouvert). Ces dernières sont tout de même connectées au circuit d'équilibrage et maintenues à la température ambiante de la pièce (environ 20 °C). Ces mesures sont comparées à la sortie d'un modèle (courbe bleu) prenant en compte un courant d'autodécharge constant et le courant d'équilibrage qui lui dépend de la tension ainsi que le courant faible prélevé sur la consommation du SPV1050 et du comparateur à hystérésis.

On modélise correctement la décharge avec une valeur de courant d'autodécharge d'environ 6 µA mais il faut noter que la pente de la courbe diminue lorsque les mesures sont espacées dans le temps (entre les jours 12 à 15). Cela montre l'influence de la consommation du multimètre lors de la mesure (charge de la capacité d'entrée) et met en doute les résultats obtenus avec le multimètre. Le courant d'autodécharge réel est donc plutôt en dessous de 6 µA.

Les calculs du courant d'autodécharge (cf §2.4.1) réalisés à partir de la mesure de la tension $V_{SC}$ montrent la dépendance vis-à-vis de la température et dans une moindre mesure en fonction du niveau de tension quand les supercapacités sont complètement chargées. Selon les essais menés nous avons donc trouvé un courant d'autodécharge compris entre 2 et 6 µA pour une température entre 20 et 25 °C. Pour la suite de cet article, par sécurité, la valeur de 6 µA sera considérée à la température ambiante, puis remise en cause.

.

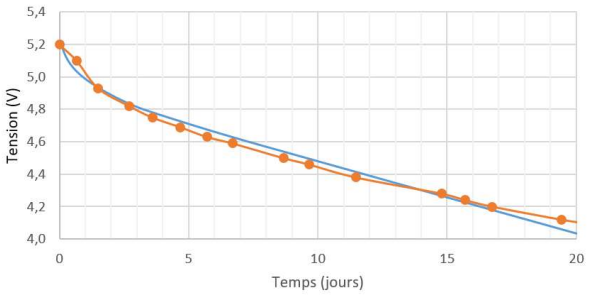



*Figure 15. Evolution de la tension $V_{SC}$. Supercapacités avec le circuit équilibrage.(Mesures et modèle). PASS ouvert.*

### 3.4 Etage Buck/Boost

Le DC/DC a été caractérisé (Figure 16, Figure 17) pour différentes tensions du panneau solaire et différentes tension $V_{STORE}$. $V_{STORE}$ est presque égale à $V_{SC}$ à la chute de tension dans le transistor PASS près (cf Figure 1). Pour des courants en dessous du milliampère, le rendement est voisin de 70%. Il est supérieur à 78 % pour des courants > à 2 mA, ce qui est tout à fait correct.

### 3.5 Rendement LDO+PASS+Comp+Equilibrage

Les mesures suivantes (Figure 18) donne le rapport entre la puissance en sortie du LDO et la puissance qui sort des supercapacités (remplacées par une source de tension pour ces mesures). Pour ces mesures, le panneau solaire est dans le noir, PASS est fermé. Le rendement dans ce test inclut les pertes du LDO, de la résistance série du transistor PASS (7 Ω), du comparateur et de l'équilibrage. Seules les pertes d'autodécharges et les pertes joules dues au ESR des supercapacités ne sont pas incluses. On note $\eta_{LDO}$ ce rendement

Les mesures ont été faites pour donner le rendement du système lorsque le nœud de capteur est en veille, puis pour les valeurs de consommation correspondantes typiques observées. Le rendement est indépendant du courant sur la gamme 1 à 18 mA.

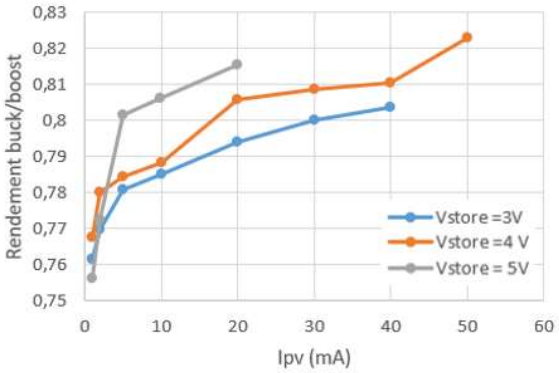



*Figure 16. Rendement du buck/boost du SPV1050 à $V_{PV}$ = 3,4V*

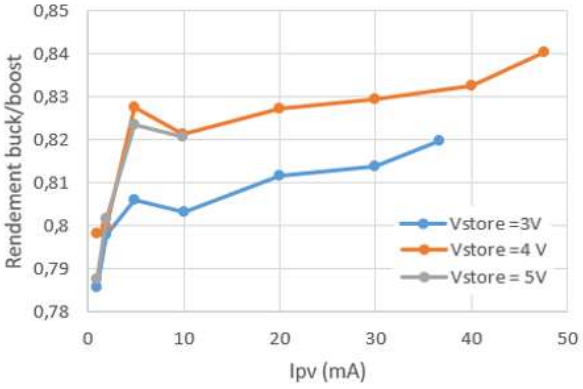



*Figure 17. Rendement du buck/boost du SPV1050 à $V_{PV}$=4,2V.*

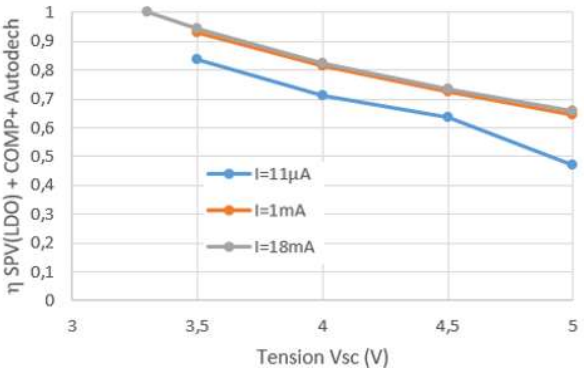



*Figure 18. Rendement du LDO+Comparateur + Autodécharge*

### 3.6 Autonomie après activation

A partir des mesures précédentes, l'autonomie est recalculée de façon itérative en effectuant le bilan

d'énergie prélevée au n$^{ième}$ cycle sur les supercapacités, notée E'$_{CYCLE}$(n). Il faut dans ce bilan considérer la phase active du nœud et la phase de veille, et rajouter les pertes par autodécharge et celles dues aux ESR des supercapacités.

$$E'_{CYCLE}(n) = \frac{1}{\eta_{LDO}(I_{SLEEP})}.(E_{SLEEP}) + \frac{1}{\eta_{LDO}(I_{MEAS})}.(E_{MEAS}) + E_{AUTODECH} + E_{ESR}$$

La

Figure *18* permet de modéliser $\eta_{LDO}$. Pour $V_{SC} \in [3,3 ; 5,3]$ V, sous la forme de premiers ordres :

$$\eta_{LDO}(I_{SLEEP} = 11\mu A) = -0{,}237.V_{SC} + 1{,}672$$

$$\eta_{LDO}(I_{MEAS} = 18mA) = -0{,}198.V_{SC} + 1{,}629$$

Les pertes par autodécharge sont évaluées avec un courant d'autodécharge pris à 6 µA, soit

$$E_{AUTODECH} = 6.10^{-6}.V_{SC}.T_{CYCLE}$$

Les pertes dues aux résistances séries des supercapacités valent :

$$E_{ESR} = (2.ESR).I^2_{SLEEP}.T_{SLEEP} + (2.ESR).I^2_{MEAS}.T_{MEAS}$$

Ces pertes sont négligeables par rapport aux autres termes.

On calcule l'énergie perdue pour chaque cycle et on en déduit la nouvelle tension des supercapacités au bout d'un temps $T_{CYCLE}$.

Au bout de n cycles de mesures, on a :

$$E_{CAP}(n+1) = E_{CAP}(n) - E'_{CYCLE}(n)$$

Et l'équation

$$E_{CAP}(n) = \frac{1}{2} C_{EQ} . V^2_{SC}(n)$$

permet de déterminer $V_{SC}$ pour l'itération suivante.

On trouve 11 jours d'autonomie avec une cadence de mesure de 5 minutes pour que $V_{SC}$ passe de 5,3 à 3,3 Volts ce qui est cohérent avec les 15 jours demandés lors du dimensionnement des supercapacités.

## 4 MESURES SUR SITE

### 4.1 Mesures Indoor

Le nœud de capteur est positionné dans une pièce (Figure 19), une fenêtre est à proximité mais il n'y a pas d'éclairage direct. Il mesure la tension des supercapacités, la température ambiante et la luminosité et transmet en radio ces informations sur un microordinateur connecté à internet qui utilise le logiciel jeedom [JE]. Le dispositif est réglé pour faire un cycle de mesure chaque 5 minutes. La Figure 20 montre l'évolution des grandeurs mesurées. On peut voir le cycle journalier (récupération d'énergie en journée et recharge des supercapacités, consommation sans recharge la nuit et donc décharge des supercapacités). Une luminosité de 200 lux permet juste de compenser la consommation du dispositif, au-delà, les supercapacités se rechargent jusqu'à un niveau maximum de 5,2 V.

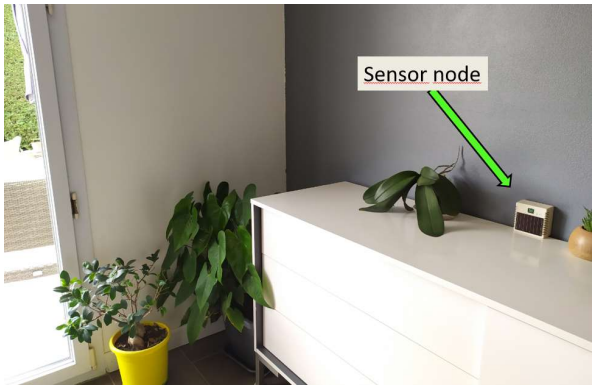



*Figure 19. Photo du dispositif placé dans une pièce, sans éclairage direct.*

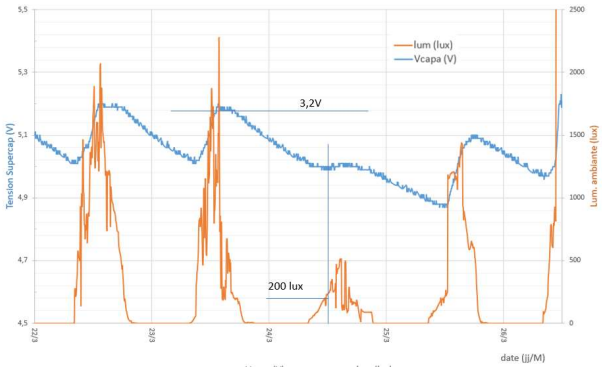



*Figure 20. Evolution de la luminosité et de la tension des supercapacités sur trois jours.*

### 4.2 Autonomie

Pour mesurer l'autonomie, le nœud de capteur est placé dans une boite opaque un matin avant que la recharge ne commence. L'évolution de la tension $V_{SC}$ est présentée sur la Figure 21. La dernière transmission de donnée a lieu pour une tension égale à 3,4 V. On mesure une autonomie de 11 jours et 19 h.

En utilisant le modèle de consommation et des pertes développé ci-dessus, on a trouvée en prenant 6 µA comme courant d'autodécharge, pour une tension $V_{SC}$ variant de 5,2 V à 3,4 V une autonomie théorique

de 10 jours 3 h, ce qui est un peu en dessous de la mesure.

Avec le même modèle, on retrouve l'autonomie mesurée en prenant dans le modèle une valeur d'autodécharge de 2 µA (comme mesurée Figure 6). Cela montre d'une part que le modèle est bien validé avec un courant de 2 µA comme mesuré lors des premiers essais. D'autre part,il est nécessaire d'avoir des moyens de mesure performant à très haute impédance d'entrée pour estimer avec précision le courant d'autodécharge à partir de la mesure de l'évolution de la tension. Ainsi la valeur de 2 µA convient parfaitement pour avoir une estimation de l'autonomie à quelques % près et à 20°C.

## 5 DISCUSSION

Différents tests ont été menés durant plus de 6 mois, et montre que le système fonctionne parfaitement.

Si l'on souhaite en sortie une tension de 3,3 V ou 1,8 V, il est plus simple d'utiliser le LDO interne au SPV1050. En revanche si l'on désire une tension différente, il faudra intégrer un LDO externe ou pour améliorer l'efficacité, il peut être plus intéressant d'utiliser un DC/DC abaisseur/élévateur ou un élévateur suivi d'un LDO. Un LDO externe connecté directement sur les supercapacités permet aussi de s'affranchir des pertes du transistor PASS dont la résistance est élevée (7 Ω). Ces différentes topologies seront présentées dans des papiers en cours d'écriture.

Le SPV1050 est un circuit facile à utiliser mais il faut noter la limitation en courant photovoltaïque à 70 mA : si la surface du panneau est trop grande ou s'il y a trop de soleil, le DC/DC ne fonctionnera plus en mode MPPT mais en limitation de courant.

## 6 CONCLUSION

Cet article a présenté la réalisation d'une alimentation DC (3,3 V, 200 mA) sans pile réalisée avec peu de composants. Simple, peu coûteux, ce système est modulable pour des niveaux de lumière variés (indoor et outdoor). Il est intégrable facilement dans un nœud de capteur et n'utilise que des circuits du commerce.

Le dimensionnement de la surface photovoltaïque et de la capacité des supercondensateurs en fonction du gisement solaire et de la consommation a été explicité pour un fonctionnement permanent.

Une fois préchargé et installé, ce dispositif peut démarrer au moment souhaité en utilisant n'importe quelle source de lumière comme déclencheur, comme celle de la LED d'un téléphone portable par exemple. Nous avons ainsi montré que cette alimentation permet pour un surcoût acceptable par rapport à une pile d'avoir un fonctionnement a priori perpétuel avec un minimum de luminosité.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été conduit dans le cadre du projet 2ido (Internet Industriel Des Objets et Des Opérateurs) financé par la BPI (Banque Public d'Investissement) dans le cadre d'un PIA (Programme d'Investissements d'Avenir)

## REFERENCES

**[KAS]** *Kasama, T., Koide, T., Bula, W.P., Yaji, Y., et al., "Low Cost and Robust Field-Deployable Environmental Sensor for Smart Agriculture", 2nd International Symposium on Devices, Circuits and Systems, Hiroshima, Japan, pp. 1-4, 2019.*

**[KAM]** *C. Kamienski, J.P.Soininen, et al., "Smart Water Management Platform: IoT-Based Precision Irrigation for Agriculture" , Sensors 2019, 19, 276; doi:10.3390/s19020276*

**[WU]** *F. Wu, T. Wu and M. R. Yuce, "An Internet-of-Things (IoT) Network System for Connected Safety and Health Monitoring Applications", Sensors 2019, 19(1), 21; https://doi.org/10.3390/s19010021*

**[YU]** *X. Yue, M. Kauer et al, "Development of an Indoor Photovoltaic Energy Harvesting Module for Autonomous Sensors in Building Air Quality Applications", IEEE Internet of Things Journal, Vol: 4 , Issue: 6 , Dec. 2017 ), DOI: 10.1109/JIOT.2017.2754981*

**[TU]** *L. Z. Turos, G. Csernath, and B. Csenteri, "Power Management in IoT Weather Station", 10th Int. Conf. and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE2018) , 2018, pp. 133–138.*

**[VG]** *https://les-smartgrids.fr/supercondensateurs-lithium-ion-avenir-stockage/*

**[MA]** *M.Mabon, M.Gautier et al., "The Smaller the Better: Designing Solar Energy Harvesting Sensor Nodes for Long-Range Monitoring", Hindawi, Wireless Communications and Mobile Computing, Volume 2019, Article ID 2878545, 11 pages, https://doi.org/10.1155/2019/2878545*

**[FI]** *F. El Mahboubi, "Stockage adaptatif pour noeud de capteur sans fil autonome et sans batterie", thèse, https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02009722/*

**[TI]** *STMicroelectronics, "SPV1050 - Ultra low power energy harvester and battery charger with embedded MPPT and LDOs"*

*https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf*

**[NO]** *https://devzone.nordicsemi.com/nordic/nordic-blog/b/blog/posts/intro-to-shockburstenhanced-shockburst]*

**[MY]** *[https://www.mysensors.org/]*

**[JE]** *[https://www.jeedom.com/site/fr/]*

**[NA]** *https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/*

**[CA]** *http://ines.solaire.free.fr/*

**[PV]** *https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis*

**[RAN]** *Randall J.F, Jacot J., "The performance and modelling of 8 photovoltaic materials under variable light intensity and spectra", LPM,IPR,STI,EPFL,CH-1015 Lausanne,Switzerland, 2002*

**[MAT]** *J. W. Matiko, N.J. Grabham et al, "Review of the application of energy harvesting in buildings", Measurement Science and Technology Jour., 2014, Meas. Sci. Technol. 25 012002 Measurement Science and Technology, doi:10.1088/0957-0233/25/1/012002*

**[GW]** *Guy Waltisperger, "Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les microsystèmes autonomes", thèse, 2011.*

**[Zh] Y. Zhang L. Wei et al.** , *"Study of supercapacitor in the application of power Electronics",WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, ISSN: 1109-2734, Issue 6, Volume 8, June 2009*

**[DI]** *Y. Diab , "Etude et modélisation des supercondensateurs ", thèse, chap 5, Université Claude Bernard Lyon 1, 2009*

**[FH]** *F. Huet,V. Boitier, "Design Strategy of Conventional Electronic for Wireless Sensor Node Powered by Vibration Energy Harvester", Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ), ISSN 2172-038 X, No.17 April 2019*

**[VB]** *V.Boitier, P.Durand Estèbe, et al. "Under Voltage Lock-Out Design Rules for Proper Start-Up of Energy Autonomous Systems Powered by Supercapacitors"***,** *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2013, 476 (1), pp.012121. ⟨10.1088/1742-6596/476/1/012121⟩*

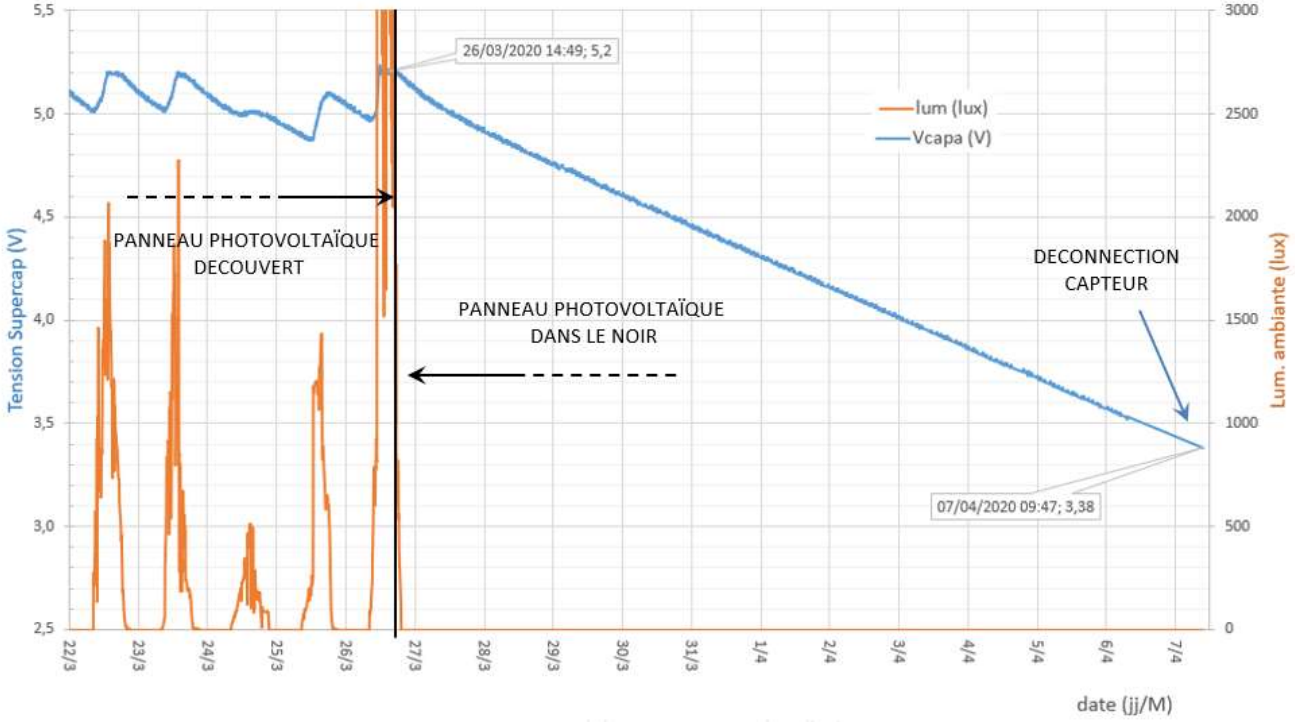



*Figure 21 : Mesure de l'autonomie*

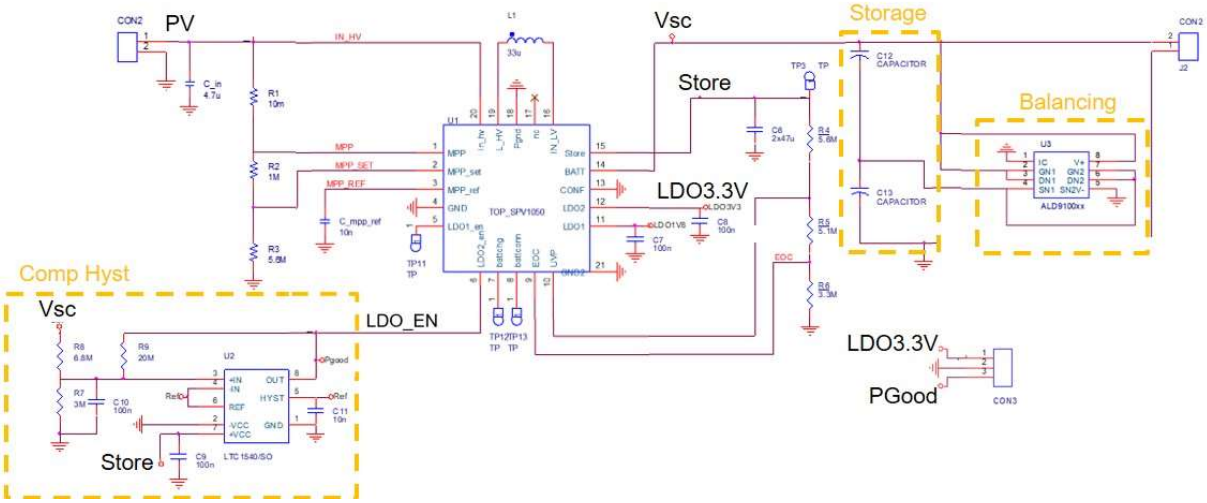



*Figure 22. Schématique du circuit électronique.*