



Alimentation de FarmBot et son impact carbone

présenté par

LIASHKEVICH TSIMAFEI, AUBIN ULYSSE,
BECKER GAÉTAN, PENAVAIRE ROBIN

RESPONSABILITÉ SOCIÉTALE DES ENTREPRISES

26 janvier

Introduction

L'objectif de ce rapport est de **proposer un système d'alimentation pour une application pratique et évaluer son impact carbone**. L'application étudiée est un robot de permaculture automatisée utilisé par les étudiants de Télécom SudParis en partenariat avec Sopra Steria dans le cadre de projet GATE FarmIA. D'après Carenews : "Le robot va analyser les plantes sur le terrain et détecter leurs besoins exacts, en termes de soin et d'alimentation. Au final, grâce à l'analyse du robot agricole, le rendement du plan de permaculture pourra être amélioré tout en minimisant les ressources utilisées" [Car]. *Le robot est composé de moteurs steppers, d'une carte électronique, d'une Raspberry Pi, de microcontrôleurs Arduino et la composante mécanique.* On se concentre sur les besoins énergétiques de composantes électroniques.

Il existe plusieurs sources d'énergies adaptées à cette application. Le but étant de choisir une source d'énergie durable, l'utilisation de **panneaux solaires** a été imposée. On commencera par étudier le fonctionnement de panneaux solaires et analyser leur production énergétique. On discutera ensuite de moyens d'évaluation de leur impact carbone et on introduira les critères de comparaison qui nous permettront de faire le choix de panneaux solaires adaptés.

On continuera par étudier le circuit d'alimentation à 2 batteries alternés, en calculant l'impact carbone des batteries, de la production des composantes nécessaires, de la production et de la livraison de la carte électronique d'alimentation. On introduira le temps d'inactivité annuelle et on verra comment faire une simulation numérique qui nous permettra d'évaluer la rentabilité écologique d'utilisation de panneaux solaires dans ce contexte pratique (FarmBot).

Table des matières

1	Le circuit d'alimentation et les besoins énergétiques de FarmBot	3
1.1	Les besoins énergétiques de FarmBot	3
1.2	La proposition de circuit d'alimentation	4
1.2.1	Différentes composantes	5
1.2.2	Évaluation d'impact carbone de régulateur et comparator/switch	5
1.3	Les panneaux solaires	5
1.3.1	Courbes caractéristiques	6
1.3.2	Critères de comparaison	6
1.3.3	Évaluation d'impact carbone	6
1.3.4	Exemple	7
1.3.5	Films photovoltaïques	8
1.4	Les batteries utilisés	10
1.4.1	Courbes caractéristiques de batteries lithium-ion	10
1.4.2	Impact carbone de batteries lithium-ion	10
2	Rentabilité écologique de panneaux solaires	11
2.1	Les variables globales	12
2.2	Simulation d'activité solaire	12
2.3	Simulation d'activité de FarmBot	13
2.4	Simulation de système d'alimentation	14
2.5	Résultats	14
3	Bibliographie	16

1 Le circuit d'alimentation et les besoins énergétiques de FarmBot

Dans cette section on étudie les besoins énergétiques de FarmBot, en construisant son modèle simplifié afin calculer le courant et la tension nécessaires à son fonctionnement. On fait aussi la proposition de circuit d'alimentation et on donne quelques éléments de circuit, en évaluant leur impact carbone.

1.1 Les besoins énergétiques de FarmBot

FarmBot est un robot agriculteur qui est capable de se déplacer suivant 3 axes avec 3 moteurs steppers et une pompe. Raspberry Pi est utilisé pour exécuter l'algorithme de IA (maximum de puissance), microcontrôleur et une carte électronique sont utilisés pour piloter les moteurs. Pour simplifier le calcul de consommation (de courant tiré) on considère que seule la charge utile (FarmBot) consomme de l'énergie. On s'intéresse alors au courant tiré par FarmBot en activité. La figure 1 représente la consommation énergétique de FarmBot.

Component	Power (Watts)	Duty Cycle (%)	Use in 1 Day (Hours)	kWh/day	kWh/year	kg CO2/day	kg of CO2/year
Raspberry Pi 2	3.0	100%	24.00	0.072	26.3	0.040	14.56
Raspberry Pi Camera	1.5	100%	24.00	0.036	13.1	0.020	7.28
Arduino Mega 2560	1.0	100%	24.00	0.024	8.8	0.013	4.85
3x NEMA 17 Stepper Motors	30.0	5%	1.20	0.036	13.1	0.020	7.28
12V tools	132.0	2%	0.48	0.063	23.1	0.035	12.81
Solenoid Valve	30.0	2%	0.48	0.014	5.3	0.008	2.91
Vacuum Pump	186.0	0.5%	0.12	0.022	8.1	0.012	4.51
Web App Server/User	20.0	1%	0.24	0.005	1.8	0.003	0.97
User's Device (laptop)	60.0	1%	0.24	0.014	5.3	0.008	2.91
			TOTALS	0.287	104.9	0.159	58.09

FIGURE 1 – La consommation énergétique de FarmBot [Far]

On suppose que la tension est délivrée par le régulateur de batteries pour chaque composante et que toutes les composantes sont connectées en parallèle. On distingue 2 modes de fonctionnement : **active** (*tout le FarmBot est actif*) et **passive** (*Raspberry Pi + Camera + Arduino*). On calcule le courant utilisé pour chaque composante :

- Chaque **moteur stepper** doit être branché à une source de tension continu **24V** et tire **1.25A** en moyenne [Sam], donc, la consommation de **3.75A** au total
- **Raspberry Pi** consomme en moyenne entre **500mA** et **885mA**, on majore cette valeur par **1A** dû au mode de fonctionnement extrême lié à l'occupation totale de processeur.
- La consommation de **Arduino et d'autres éléments** est majorée par **1A**.
- Une **pompe** tire le courant de **7A** en moyenne.
- Camera tire **500mA**.

On obtient **2.5A** de courant utilisé en mode passif et **13.25A** en mode actif. Dans les prochaines sections on utilisera le terme **Load** pour faire référence aux composants électroniques

de FarmBot. **Load** doit être branché à une source de tension continue **24V**. Il consomme **8A** en termes de courant.

1.2 La proposition de circuit d'alimentation

Maintenant qu'on connaît la consommation énergétique de FarmBot (**Load**) on peut concevoir le circuit électronique. Dans le cadre de notre étude seul le schéma bloc de circuit est représenté (cf figure 2) et quelques éléments de circuit électronique réel sont donnés dans cette section (cf figure 3). On ne peut pas brancher un panneau solaire directement au **Load**, car il ne délivre pas la tension continue et ne se trouve pas constamment à son maximum de puissance à cause de changements météorologiques. On est obligé d'utiliser un panneau solaire comme la source de charge d'une batterie lithium-ion (*on choisit cette technologie pour des raisons de performance et de la faible chute de tension*). Or on ne peut pas avoir une batterie en charge et en utilisation dans le même circuit, **on utilise le système à 2 batteries avec un comparator switch et le chargement alterné** (cf figure 2).

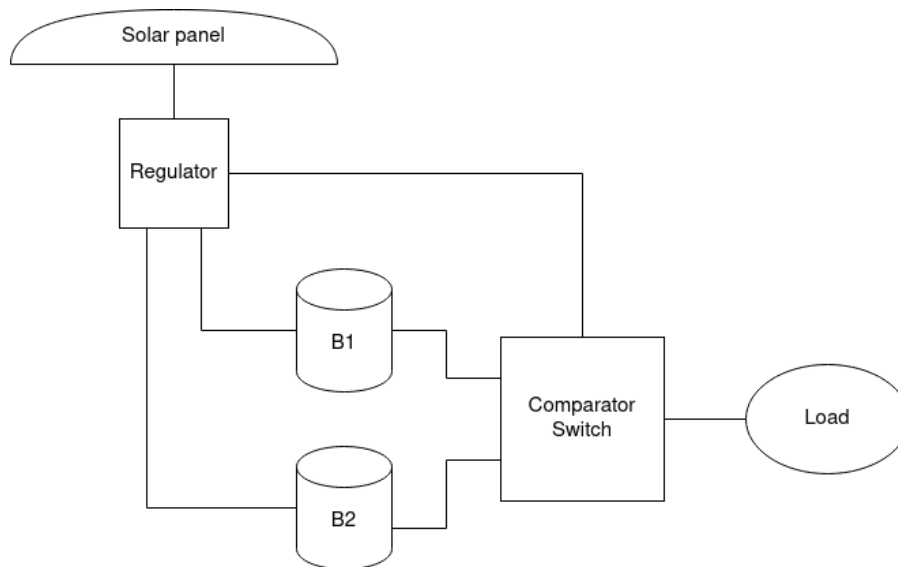


FIGURE 2 – Schéma bloc de circuit d'alimentation

Le principe de fonctionnement est le suivant : le **comparator switch** compare la tension de la première batterie avec une tension de seuil choisie grâce à la caractéristique V/C de la batterie (cf section 1.4.2) et en même temps la deuxième batterie est chargée. Une fois la tension tombe sous un certain seuil, la deuxième batterie est utilisée et la première est chargée avec la tension de seuil qui est modifiée. La figure 3 montre le schéma de circuit **comparator/switch** (**Attention : ce circuit est au début de sa conception et permet d'illustrer une idée, il n'est pas utilisable !**). Les régulateurs sont disponibles sur le marché et sont souvent vendus avec les panneaux solaires.

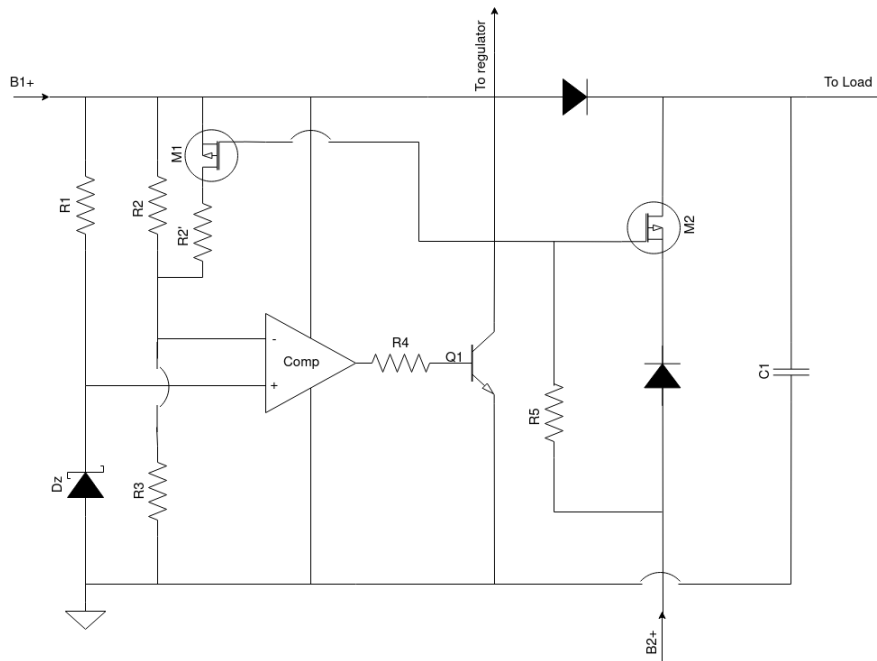


FIGURE 3 – Circuit comparateur/switch inspiré par [Raf]

1.2.1 Différentes composantes

Le circuit d'alimentation contient les composantes suivantes : **2 batteries**, **un panneau solaire**, **un régulateur**, **un circuit comparator/switch** et **un Load (FarmBot)**. L'évaluation de l'impact carbone de différents panneaux solaires et batteries fait l'objet de *sections 1.3 et 1.4* respectivement. Dans cette section on se concentre sur les méthodes d'évaluation d'impact carbone de régulateur et de **comparator/switch**. On prendra en compte les paramètres suivants : le pays de production, les matériaux utilisés, la livraison, la production de la carte électronique, la production des composants électroniques.

1.2.2 Évaluation d'impact carbone de régulateur et comparator/switch

Aucune étude ou source d'information, qui permet d'évaluer l'impact carbone de la production et de la livraison de la carte électronique, n'a été trouvée. Ainsi, l'impact carbone de régulateur et comparator/switch n'est pas pris en compte (l'impact négligeable par rapport à la production totale de cartes électroniques).

1.3 Les panneaux solaires

Dans le cadre de notre étude, les panneaux solaires ont été imposés comme une source d'énergie durable. Dans cette section on propose des critères de comparaison qui influencent le rendement utilisateur et l'impact carbone de panneaux solaires. On présentera la formule qui permet de calculer l'impact carbone selon les critères choisis et on donnera de vrais exemples de panneaux solaires présents sur le marché.

1.3.1 Courbes caractéristiques

Les courbes caractéristiques ci-dessous reflètent la dépendance de l'intensité de courant en fonction de la tension et l'irradiance solaire (Q). On s'intéresse à la droite MPP (**maximal power**) qui nous permet de déduire *l'intensité maximale en fonction de l'irradiance solaire pour une tension maximale constante*. On remarque que l'intensité diminue avec la diminution d'irradiance.

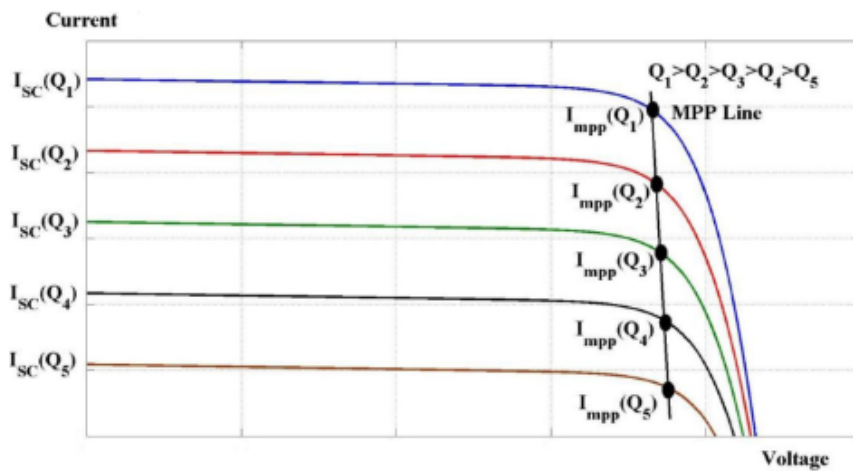


FIGURE 4 – Courbe V-I d'un panneau solaire pour différentes irradiances [Mus15]

On peut utiliser la formule suivante pour calculer l'intensité en fonction de l'irradiance solaire :

$$I = \frac{R \times S \times \mu}{V}$$

où R est une irradiance solaire, S est une surface d'un panneau solaire et μ est un rendement d'un panneau solaire.

1.3.2 Critères de comparaison

On compare les panneaux solaires selon leur rapport qualité/prix, où la qualité est leur rendement utilisateur et le prix est leur impact carbone. Pour pouvoir simuler leur rendement utilisateur et calculer leur impact carbone on a besoin de critères de comparaison ou encore de grandeurs donnés par le producteur. Dans le cadre de cette étude les critères suivants ont été choisis : **type de panneau, surface, pays de production, matériel utilisé, rendement, puissance maximale**.

1.3.3 Évaluation d'impact carbone

L'impact carbone de panneau solaire est calculé à partir de sa surface, son pays de production, son pays de distribution et le matériel utilisé. On utilise les données issues de document de

Provenance des modules	Évaluation carbone moyenne du panneau (en kgCO ₂ eq kWc) ¹⁰	Écart par rapport à la France (en %)
France	355	-
Allemagne	416	+ 17
Mexique	374	+ 5
République Tchèque	376	+ 6
Asie	389	+ 9

FIGURE 5 – Évaluation carbone moyenne du panneau par origine [PIL]

	Rendement nominal en %	Prix moyen en €/MWh	Empreinte carbone moyenne en kg CO ₂ eq/kWc
Polysilicium	18,6	56,5	480
Monosilicium	19,5 %	54,7	339
Couches minces	17,1 %	58,2	300

FIGURE 6 – Évaluation carbone moyenne du panneau par matériel utilisé [PIL]

travail "Les panneaux solaires bas-carbone en France : un enjeu environnemental, une opportunité industrielle ?" [PIL] (cf figure 5 et figure 6).

On prend la valeur moyenne d'équivalent carbone par pays de production et par matériel utilisé. On obtient la quantité de CO₂ produite en multipliant cette valeur par la puissance maximale de panneau solaire. On ajoute l'impact carbone de la livraison à cette valeur.

Soit G_1 l'évaluation carbone moyenne du panneau par pays et G_2 l'empreinte carbone moyenne par matériel utilisé. Soit P_{max} la puissance maximale produite par un panneau solaire. Soit $s_{country_of_origin}$ la distance entre la France et le pays de production. On note $G_s = 2.4kgCO_2/km$ la quantité de gaz produite par un camion qui livre le panneau solaire. L'impact carbone d'un panneau solaire peut être calculé selon la formule suivante :

$$IC = \frac{G_1 + G_2}{2} \times P_{max} + s_{country_of_origin} \times G_s$$

1.3.4 Exemple

La figure ci-dessous donne un exemple de panneaux solaires monosilicium 24V. Ce sont des exemples réels présents sur le marché.

Number	Reference	Type	Area	Efficiency	Origin	Power	Material
1	https://allo.solar/panneau-s	fixed	1.95	0.207	Asia		405 Monosilicium
2	https://allo.solar/panneau-s	fixed	1.68	0.199	Asia		335 Monosilicium
3	https://www.chocdiscount.c	fixed	2.16	0.213	Asia		460 Monosilicium
4	https://www.acontre-courat	fixed	2.37	0.21	France		500 Monosilicium
5	https://www.manomano.fr/j	fixed	2.24	0.22	France		500 Monosilicium

FIGURE 7 – Comparaison de panneaux solaires

1.3.5 Films photovoltaïques

Une bonne alternative aux panneaux solaires existent cependant. **Les films photovoltaïques** fonctionnent de manière similaire aux panneaux, mais ils offrent une meilleure adaptabilité dans les cas généraux.

En effet, lors de déploiements de cellules photovoltaïques, certaines surfaces à couvrir peuvent s'avérer très complexes avec l'emploi de panneaux solaires classiques. Les surfaces courbées nécessitent des panneaux spécialisés, presque sur-mesure, ce qui ne facilite en aucun cas le déploiement.

Pour remédier à cela, les entreprises peuvent se tourner vers les films photovoltaïques : des écrans fins et flexibles capable de s'adapter à toutes les conditions. L'épaisseur d'un tel film va du nanomètre à la dizaine de micromètres. Cela le démarque en grande partie des panneaux photovoltaïques plus classiques. Cette spécificité en entraîne naturellement d'autres.

La flexibilité du produit : une telle finesse permet naturellement l'application du produit à des surfaces bien plus variées et complexes que de simples plans. Un film peut épouser la courbure d'une surface et il est simple de l'ajuster. Un film est aussi plus simple à poser, de par leur finesse, il est possible d'en intercaler entre des vitrages.

La réduction du coût de production : la finesse du film se traduit par une baisse de la quantité de matière nécessaire à sa production. Les films sont donc moins coûteux que les panneaux à produire.

Lors de la création d'un film photovoltaïque, on incorpore des couches minces dites TF (thin film) sur un substrat généralement transparent comme du verre, ou bien des métaux. Les couches minces photovoltaïques commercialisées actuellement utilisent plusieurs matières, notamment le tellure de cadmium (de formule CdTe), le diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS) et le silicium amorphe (a-Si, TF-Si).

Jusque là, les films solaires ne rivalisent pas avec les panneaux en termes de production énergétique. Cependant, leur production énergétique s'est considérablement améliorée et l'efficacité des cellules en couche de tellure de cadmium (CdTe) et diséléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS) de laboratoire dépasse les 21 pourcent, surpassant le silicium polycristallin, le matériau actuellement dominant dans la plupart des systèmes solaires photovoltaïques.

ASCA semble être une solution innovante peu polluante et intéressante à suivre pour le futur. Pour le moment, il est complexe de déployer cette solution en France à cause des restrictions sur l'urbanisme. En Allemagne, cette solution a été rapidement démocratisée et elle orne désormais bon nombre de bâtiments publics depuis 2017.

Cette solution est d'autant plus attirante qu'elle est nouvelle. Aucun métal rare n'est utilisé lors de la production du fameux "écran solaire" appliqué à des modules. Le bilan carbone en est très allégé. Cette procédure assure également des matériaux non toxiques et non cancérigènes. De plus, les modules photovoltaïques peuvent être revalorisés par la suite dans le cadre de CSR (revalorisation thermique).

Un autre avantage de ces modules est la liberté. Puisqu'il est question d'appliquer une

certaines l'ont sur des modules semi-transparent, la forme est libre. ASCA propose des offres dites "free-form" grâce auxquelles il est possible de demander des modules photovoltaïques de la forme que l'on souhaite comme une feuille d'érable, ou bien des losanges de tailles variées. Cette flexibilité permet à ASCA d'offrir une panoplie de solutions pour tous les usages. Ces modules ont aussi l'avantage d'être très légers, et donc facilement manipulables.

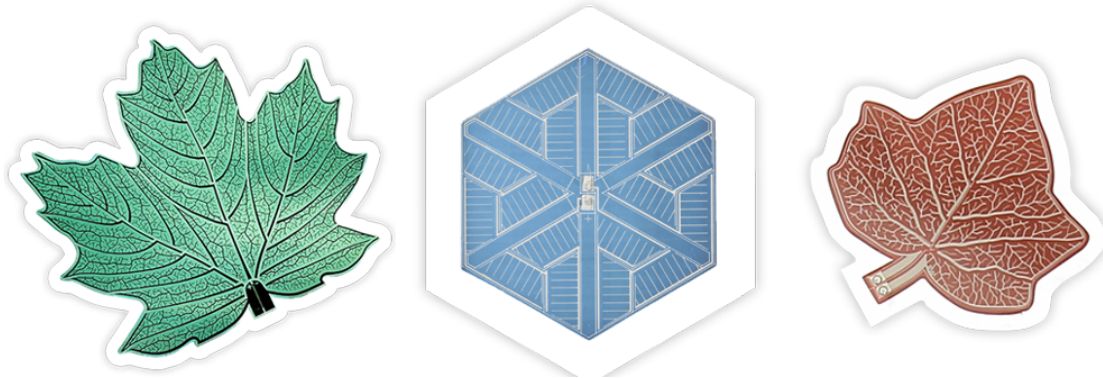


FIGURE 8 – Cellules solaires souples accomplies proposées par ASCA





	 Blue	 Green	 Red	 Grey
GENERAL INFORMATION				
OPV inlay thickness	0.3 +/- 0.1 mm			
Operating temperature range	-20 °C to 65 °C			
Storage temperature	-40 °C to 85 °C			
NOCT	48 °C			
ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC*				
Short circuit current	1.0 – 9.6 A	0.8 – 8 A	0.7 – 7 A	1.1 – 10.5 A
Open circuit voltage	0.76 V / Cell	0.76 V / Cell	0.55 V / Cell	0.76 V / Cell
Current at MPP**	0.7 – 7.1 A	0.6 – 5.8 A	0.5 – 5.1 A	0.8 – 7.8 A
Voltage at MPP**	56 – 5.6 V	55 – 5.5 V	40 – 4.0 V	56 – 5.6 V
Power at MPP**	35 – 45 W	35 – 45 W	20 – 30 W	35 – 45 W
TEMPERATURE COEFFICIENT (based on 25°C)				
Temperature coefficient Pmax	+0.02 %/°C	+0.04 %/°C	+0.05 %/°C	+0.04 %/°C
Temperature coefficient Vmpp	-0.23 %/°C	-0.17 %/°C	-0.11 %/°C	-0.17 %/°C
Temperature coefficient Voc	-0.19 %/°C	-0.11 %/°C	-0.17 %/°C	-0.16 %/°C

FIGURE 9 – Information technique pour 1 OPV de surface 1m²

En termes d'énergie et de coût, ASCA assure un impact carbone faible lors du cycle de vie des modules photovoltaïques. Le film ne prend que quelques mois pour produire l'équivalent énergétique nécessaire à sa production. Le rendement est très bon, voire bien meilleur que le reste du marché photovoltaïque.

En 2020, ASCA, en collaboration avec **Raynergy Tek**, assure un rendement en environnement low-light de 26 pourcent. Le film OPV d'ASCA est donc tout aussi efficace en intérieur, ou bien avec de l'éclairage artificiel. L'apparition de nouveaux matériaux semi-conducteurs fournis par Raynergy Tek a aussi permis une augmentation des rendements de 40 pourcent des OPV.

Toutes ces solutions sont très prometteuses, cependant elles restent difficiles d'accès pour des particuliers ou de simples projets. Le site ASCA ne permet pas encore l'achat de leurs produits pour le moment.

La majorité des accès aux films photovoltaïques sont sur des sites de grands fournisseurs, où il est complexe de vérifier les différentes valeurs ou performances d'un système en particulier.

1.4 Les batteries utilisés

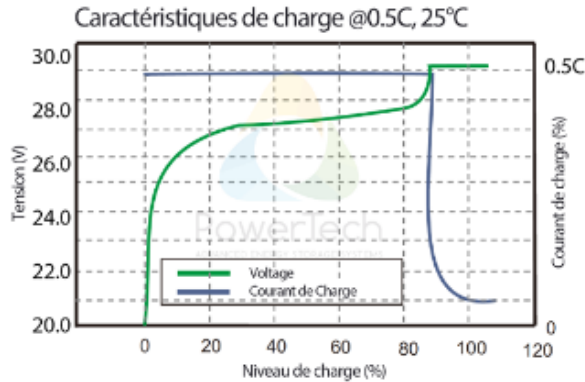
On utilise 2 batteries lithium-ion rechargeables pour alimenter le FarmBot. La première batterie est une batterie principale. Tant que la capacité de cette batterie ne tombe pas en dessous de certain seuil la deuxième batterie (**backup**) est chargée. Si les 2 batteries sont déchargées le système se trouve en inactivité tant que la première batterie n'est pas suffisamment chargée. La capacité de batteries (**Ah**) dépend du courant que le panneau solaire est capable de fournir (cf la figure 10a de chargement de la batterie).

1.4.1 Courbes caractéristiques de batteries lithium-ion

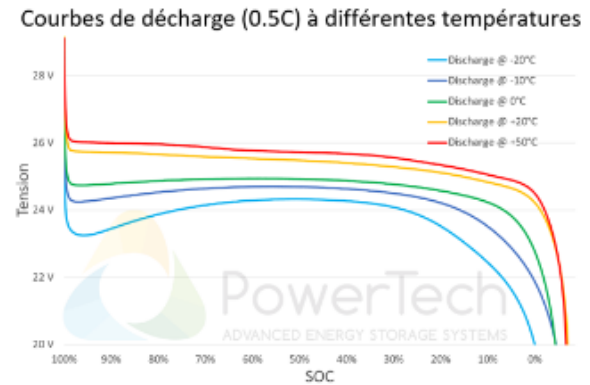
Les 4 courbes ci-dessus présentent les caractéristiques de charge, décharge, auto décharge et profondeur de décharge de batteries lithium-ion. On remarque qu'on a besoin de fournir la moitié de courant de capacité pour charger une batterie et que le seuil de décharge fait approximativement 10% de la capacité de la batterie. On prendra 90% comme le seuil de charge.

1.4.2 Impact carbone de batteries lithium-ion

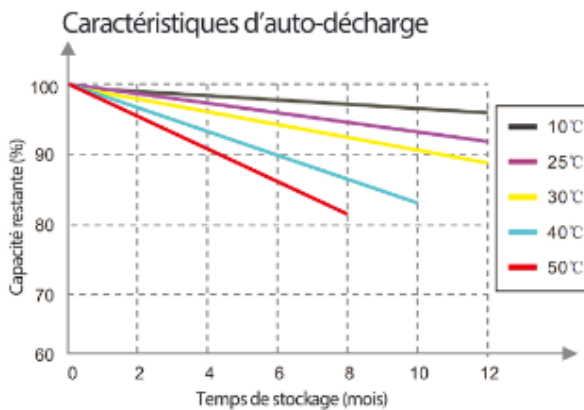
D'après plusieurs sources une batterie lithium-ion produit environ $175kgCO_2/kWh$. On gardera le compteur de l'énergie produite par une batterie.



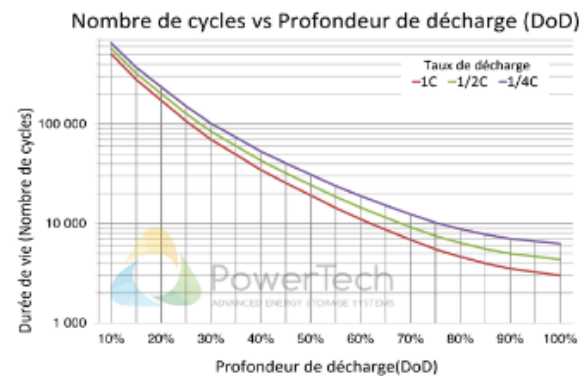
(a) Charge



(b) Décharge



(c) Autodécharge



(d) Profondeur de décharge

FIGURE 10 – Les courbes caractéristiques de la batterie lithium-ion [wn]

2 Rentabilité écologique de panneaux solaires

On utilise le critère **qualité/prix** pour évaluer la rentabilité écologique de panneaux solaires. L'utilisateur final du système décrit dans la *section 1* est intéressé par le maximum d'heures d'activité possibles. Le rendement utilisateur est défini comme le nombre d'heures d'activité de FarmBot divisé par le nombre d'heures d'activité demandée. Or le nombre d'heures d'activité dépendent de 3 facteurs : **fonctionnement de système d'alimentation, l'activité de FarmBot et l'activité solaire**. Le système et les facteurs dont il dépend étant très complexes, on effectue plusieurs simulations afin de calculer le rendement utilisateur moyen pour chaque panneau solaire particulier. On classe les panneaux solaires en comparant leurs rendements utilisateur et leurs impacts carbone.

2.1 Les variables globales

On ajoute à notre simulation *le compteur global*, qui est capable de nous indiquer la saison de l'année, l'heure de la journée et le jour de l'année via les variables **season**, **t**, **day** respectivement.

On dispose de valeurs $set_{day,season}$ et $down_{day,season}$ qui indiquent **le temps d'activité solaire**.

On note **activity** le nombre d'heures d'activité de FarmBot et **requested_activity** le nombre d'heures où l'activité de FarmBot a été demandée.

Le rendement utilisateur est défini comme suit $r = \frac{activity}{requested_activity}$.

On note C la capacité des batteries utilisés. On note I le courant consommé par FarmBot lors de son activité.

2.2 Simulation d'activité solaire

Le premier facteur est l'activité solaire, qui influe directement sur la production énergétique de panneaux solaires et sur la possibilité de charger une batterie avec une énergie solaire (la tension et le courant suffisent durant une période de temps).

On s'est inspiré de l'étude "Markov Chain model for solar farm generation and its application to generation performance evaluation" effectuée par Shuwei Miao, Guangtao Ning, Yingzhong Gu, Jiahao Yan et Botao Ma [Mia18]. Cette étude permet d'identifier une chaîne de Markov qui décrit les transitions entre différents états d'activité solaire en utilisant les données récoltées.

On fait l'hypothèse que l'activité solaire change brusquement entre chaque saison. Ainsi on définit une matrice de transition pour chaque saison. Le nombre d'État peut varier pour chaque saison. La transition d'un état à un autre se fait brusquement chaque heure. Le raisonnement suivant est applicable pour chaque saison.

Soit $(T_1, R_1), \dots, (T_N, R_N)$ les mesures de températures et de l'irradiation solaire prises chaque heure durant une saison. On note $T_{min}, T_{max}, R_{min}, R_{max}$ les températures et les irradiances maximales et minimales durant un saison respectivement. On note M_T, M_R le nombre d'états discrets de température et d'irradiation considérés dans le cadre d'une simulation. On définit le pas discret de la température et le pas discret de l'irradiation comme suit :

$$\begin{cases} \delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{M_T} \\ \delta R = \frac{R_{max} - R_{min}}{M_R} \end{cases}$$

Cela nous permet de définir les valeurs caractéristiques et de transformer la suite de valeurs réelles en une suite de valeurs représentatives. On définit des valeurs représentatives de tempé-

rature et d'irradiation solaire comme suit :

$$\begin{cases} T^{(j)} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i 1_{T_i \in [T_{min} + j\delta T, T_{min} + (j+1)\delta T]}}{\sum_{i=1}^N 1_{T_i \in [T_{min} + j\delta T, T_{min} + (j+1)\delta T]}} \\ R^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i 1_{R_i \in [R_{min} + k\delta R, R_{min} + (k+1)\delta R]}}{\sum_{i=1}^N 1_{R_i \in [R_{min} + k\delta R, R_{min} + (k+1)\delta R]}} \end{cases}$$

On peut maintenant transformer une suite de valeurs réelles $(T_1, R_1), \dots, (T_N, R_N)$ en une suite $(T^{(j_1)}, R^{(k_1)}), \dots, (T^{(j_N)}, R^{(k_N)})$. On définit désormais la probabilité de transition entre les états $(T^{(a)}, R^{(b)})$ et $(T^{(c)}, R^{(d)})$ comme suit, en notant $N_{((a,b),(c,d))}$ le nombre de transition entre les états (a, b) et (c, d) respectivement.

$$w_{((a,b),(c,d))} = \frac{N_{((a,b),(c,d))}}{N}$$

On peut définir une matrice de transition W comme suit :

$$\begin{pmatrix} w_{[(0,0),(0,0)]} \dots & w_{[(0,0),(M_T-1,M_R-1)]} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ w_{[(M_T-1,M_R-1),(0,0)]} \dots & w_{[(M_T-1,M_R-1),(M_T-1,M_R-1)]} & \dots \end{pmatrix}$$

En utilisant la matrice de transition et les états discrets on peut simuler l'activité solaire pour chaque saison au cours de l'année. Afin de construire la matrice de transition on peut utiliser les données issues de **NSRDB** (*National Solar Radiation Database*). Voici le lien vers [leur site](#).

2.3 Simulation d'activité de FarmBot

On simule l'activité de FarmBot par une suite (p_1, \dots, p_N) de probabilité de passage de FarmBot en mode **active**. On note (l_1, \dots, l_{N-1}) une suite de 0 et de 1 indiquant si le FarmBot était actif ou pas à l'instant de temps précis. On note p_0 la probabilité d'activation initiale et le δp le pas discret d'augmentation de la probabilité au cours de temps. On a $p_1 = p_0$ et :

$$p_i = \begin{cases} p_0, & \text{if } l_{i-1} = 1 \\ \min(p_{i-1}, 1), & \text{if } t \leq \text{set}_{day,season} \text{ or } t \geq \text{down}_{day,season} \\ \min(p_{i-1} + \delta p, 1), & \text{if } \text{set}_{day,season} < t < \text{down}_{day,season} \end{cases}$$

On suppose que FarmBot reste en mode active toute une heure qui suit le moment de son activation. Ensuite il passe en mode passive.

2.4 Simulation de système d'alimentation

La dernière étape est de simuler le comportement de système d'alimentation et, plus précisément, de la charge et de la décharge de batteries. On se limitera à décrire son principe de fonctionnement. Le code de la simulation est disponible sur [github](#).

On utilisera les courbes de charge et de décharge de batteries lithium-ion (*cf figure 10a et 10b*) et la courbe caractéristique V-I de panneau solaire (*cf figure 4*). Le fonctionnement de circuit d'alimentation est décrit dans la **section 1.2**.

On note V_{s1} et V_{s2} 2 tensions de seuil de la première batterie. La deuxième batterie est chargée quand la première batterie se trouve dans un état actif et vis versa. La charge et l'activité de 2 batteries sont déterminées par la tension de la première batterie par rapport aux tensions de seuil.

Quand les 2 batteries sont déchargées, c'est la première batterie qui est chargée jusqu'à son état opérable. Durant ce temps les requêtes d'activités ne peuvent pas être satisfaites. La décharge de la batterie dépend de la température.

Une batterie est en cours de chargement si et seulement si un panneau solaire délivre le courant suffisant, ce qui dépend exclusivement de l'irradiance solaire et de rendement de panneau solaire (**cf section 2.2**).

2.5 Résultats

La figure 12 présente les résultats de la simulation pour les panneaux solaires de la figure 11. Les données d'activité solaire à Paris en 2018 ont été utilisées afin de produire les matrices de transition et de simuler le comportement de température et d'irradiance solaire. Les données présentées correspondent à la période estivale, les autres périodes introduisant une forte chute en rendement.

A	B	C	D	E	F	G	H
Number	Reference	Type	Area	Efficiency	Origin	Power	Material
1	https://allo.solar/panneau-fixed	fixed	1.95	0.207	Asia	405	Monosilicium
2	https://allo.solar/panneau-fixed	fixed	1.68	0.199	Asia	335	Monosilicium
3	https://www.chocdiscount.com	fixed	2.16	0.213	Asia	460	Monosilicium
4	https://www.acontre-coura.com	fixed	2.37	0.21	France	500	Monosilicium
5	https://www.manomano.fr	fixed	2.24	0.22	France	500	Monosilicium
6	-	-	5	0.2	France	1000	Monosilicium
7	-	-	5	0.2	Mexico	1000	Monosilicium
8	-	-	6	0.16	France	960	Polysilicium
9	-	-	6	0.2	France	1200	Monosilicium
10	-	-	6	0.2	Asia	1200	Monosilicium

FIGURE 11 – Les panneaux solaires qui ont été simulés

Comme on peut le voir, l'impact carbone de panneaux solaires issus de l'Asie ou du Mexique est très supérieur à ceux issus de la France. La majorité de CO_2 provient de la transportation.

Le Monosilicium reste une technologie à privilégier, car elle donne le meilleur rendement pour le même impact carbone.

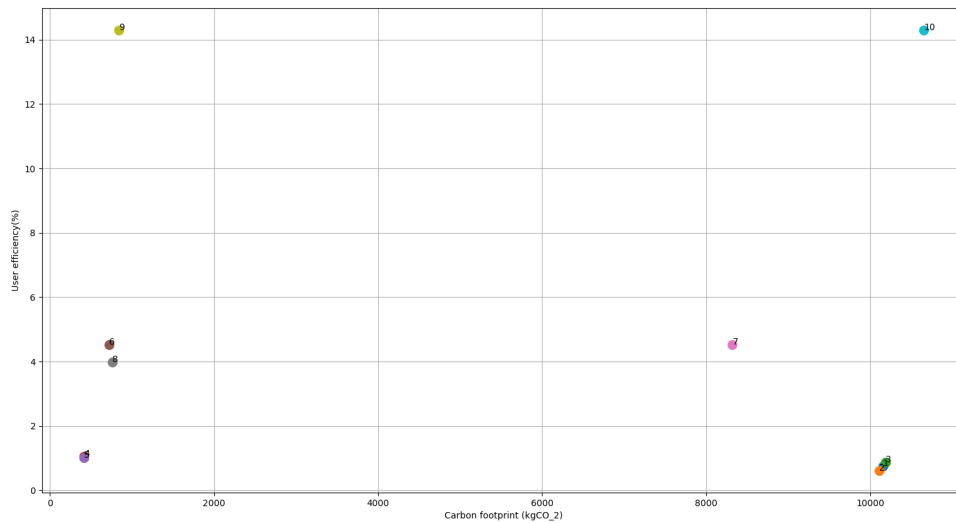


FIGURE 12 – Les résultats de la simulation

L'augmentation de surface d'un panneau solaire augmente son rendement utilisateur et son impact carbone. La figure suivante présente la dépendance entre la surface de panneau solaire, son impact carbone et son rendement utilisateur :

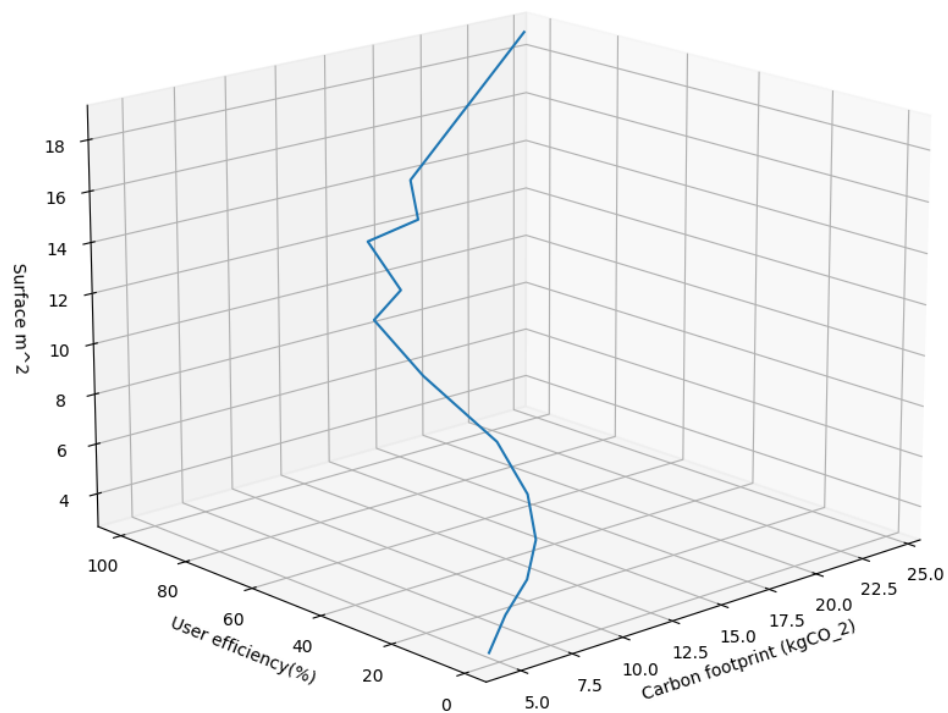


FIGURE 13 – Rendement utilisateur et impact carbone en fonction de surface

3 Bibliographie

Références

- [Car] CARENEWS. *FarmIA, un projet de permaculture connectée récompensé par la Fondation Sopra Steria-Institut de France*. URL : <https://www.carenews.com/fr/news/farmia-un-projet-de-permaculture-connectee-recompense-par-la-fondation-sopra-steria>. (accessed : 07.01.2023).
- [Far] FARMBOT. *Exploring the Carbon Footprint of FarmBot*. URL : https://farm.bot/pages/footprint?fbclid=IwAR0nfQm7eopqJq3_0Eh6VSsh2TJFbA7GWWJ5Ndutxs31L5307yKbrv. (accessed : 09.01.2023).
- [Mia18] Shuwei MIAO. "Markov Chain model for solar farm generation and its application to generation performance evaluation". In : *Journal of Cleaner Production* 186 (2018), p. 905-917. DOI : [10.1016/j.jclepro.2018.03.173](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.173).
- [Mus15] Engin Başoğlu MUSTAFA. "An improved incremental conductance based MPPT approach for PV modules". In : *TURKISH JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING COMPUTER SCIENCES* 23 (2015), p. 1687-1697. DOI : [10.3906/elk-1404-196](https://doi.org/10.3906/elk-1404-196).
- [wn] *Pack Lithium Ferro-Phosphate (LiFePO₄) - 24V - 150Ah*. TJA1043. v1.4. PowerTech systems. unknown.
- [PIL] Louis-Samuel PILCER. *Les panneaux solaires bas-carbone en France : un enjeu environnemental, une opportunité industrielle?* URL : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/default/document_travail_53_panneaux_solaires_octobre2021_3.pdf. (accessed : 13.01.2023).
- [Raf] Heath RAFTERY. *StackExchange answer*. URL : <https://electronics.stackexchange.com/questions/426398/switch-to-battery-when-voltage-supply-drops-certain-threshold>. (accessed : 08.01.2023).
- [Sam] Michel SAMOEY. *Le moteur pas à pas et son circuit de commande*. URL : <http://sam.electroastro.pagesperso-orange.fr/dossiers/pasapas/moteurpas2.htm>. (accessed : 07.01.2023).