

Séminaire Terraforma

Alimentation électrique de capteurs autonomes : avec ... ou sans batterie.

Vincent Boitier vboitier@laas.fr

15 mars 2024

Agrégé de physique appliquée
MCF HDR à l'Université Paul Sabatier Toulouse III
et chercheur au LAAS-CNRS

Domaines de recherches :

- **Récupération de l'énergie ambiante** (lumière, ΔT , vibrations) pour alimenter des capteurs sans fil.
- **Estimation du gisement énergétique** (éolien, solaire).
- **Commande et dimensionnement de convertisseurs photovoltaïque** (100mW à 10W)
- Mise en oeuvre de **réseaux de capteurs sans fils** pour l'IoT.



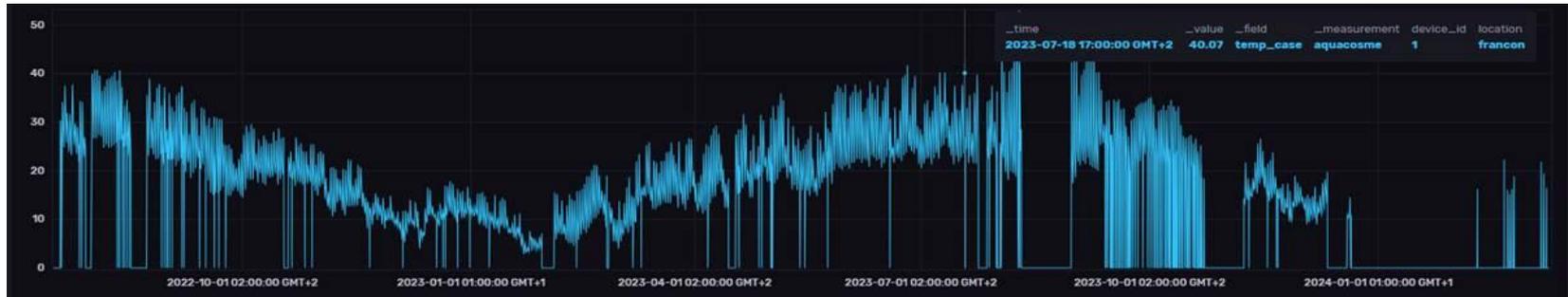
Gamme : 100 μ W à 10W, (capteur IOT mais pas seulement!)

Expérience : depuis 2008 sur ces thématiques/ Réalisations à TRL élevé (aéronautique).

Spécificités : Gestion des cas difficiles : **températures extrêmes**, intermittence, **système sans batteries, démarrage sans énergie initiale**



Alimentation électrique de capteurs autonomes : avec ou sans batterie.



Objectifs de cette présentation:

Présenter et analyser les blocs nécessaires à la fourniture d'énergie d'un système autonome.
Comprendre le dimensionnement et le contrôle de ces blocs.

Plan // Sources d'énergie

// Structure générale d'une alimentation autonome

// Batterie vs Supercap

// Etage de sortie

// Panneau PV et commande MPPT

// Circuits de récupération d'énergie et gestion du stockage.

// Dimensionnement

Alimentation électrique de capteurs autonomes : avec ou sans batterie.

Une bonne alimentation doit se faire oublier, pour cela elle doit :

Fournir le niveau de tension désirée avec la stabilité requise (ondulation).

Encaisser les pics de courant en gardant une tension stable

Supporter le chaud et le froid

Etre sans maintenance ou presque

Et elle doit avoir :

une longue durée de vie, un faible poids /faible volume/ faible prix et approvisionnement facile

Pour une alim, il faut de l'énergie, où la prendre? : Solutions possibles =>

Quelles solutions possibles pour la source d'énergie?

Réseau de puissance + tirage de câble
(fiable mais coût infrastructure)

Batterie non rechargeable / rechargeable (+ personnel)
(fiable mais pb autonomie, maintenance)

Batterie rechargeable + source non renouvelable
(brûleur gaz+thermogénérateur) ou (essence + groupe électrogène)
(adapté environnement extrême, fiable, autonomie)

Batterie rechargeable/supercondensateur + source énergie ambiante
+ transducteur adapté , panneau solaire ou thermogénérateur
(autonomie, durée de vie).



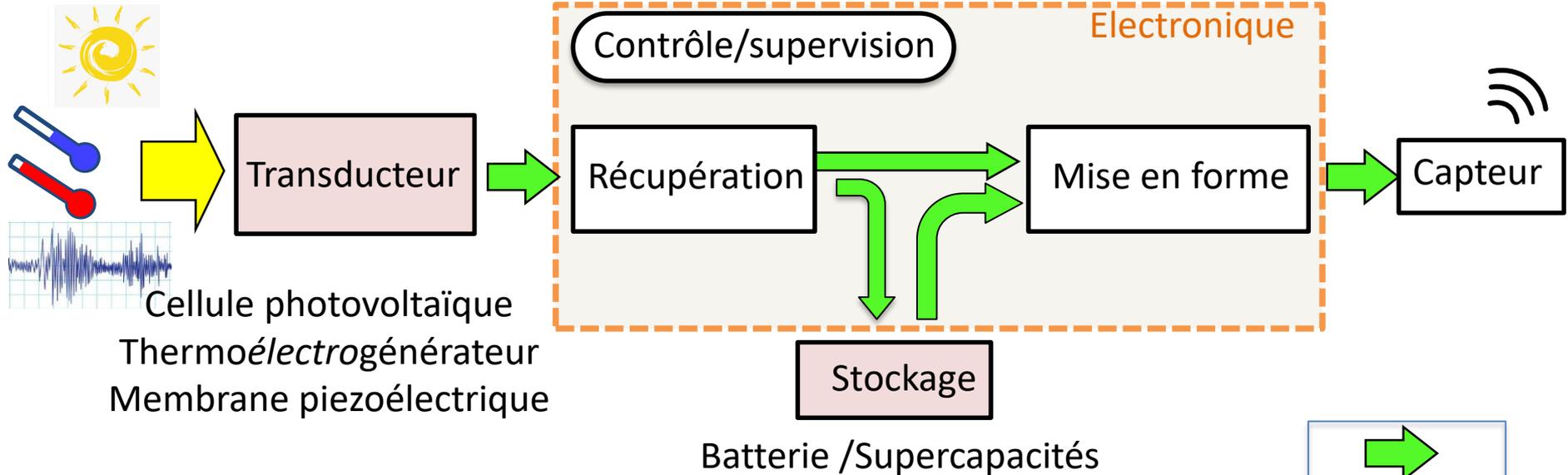
Quelles structures électroniques? =>

Structure d'une alimentation autonome

Source
d'énergie
ambiante

Transducteur, Récupération, **Stockage**, Mise en forme
+ Contrôle (MPPT, UVLO, BMS) + Protections

Charge à
alimenter
(capteur)



Fonctions du bloc électronique :

- // Récupérer l'énergie disponible et la stocker.
- // Mise en forme de l'énergie pour le capteur.
- // Protections (batterie, court-circuit)/démarrage

Le stockage =>

Saft primary lithium

Tension stable / Energie OK/ Puissance OK

Gamme de température **-60/+85°C**

Série LSH jusqu'à +150°C.

Stockage : **1% à 3% de perte de capacité /an @+ 20°C.** Utilisations typiques : **5 ans ou +.**

	ENERGY		POWER	HIGH TEMPERATURE	
	LS 14250	LS 33400	LSH 20	LSH 20-HTS	LSH 20-150
Cell size	1/2 AA	D	D	D	D
Cell construction	Bobbin	Bobbin	Spiral	Spiral	Spiral
Nominal voltage	3.6 V	3.6 V	3.6 V	3.6 V	3.6 V
Nominal capacity	1.2 Ah	17.0 Ah	13.0 Ah	11.0 Ah	14.0 Ah
Max. continuous current	35 mA	250 mA	1.8 A	1.0 A	300 mA
Max. pulse discharge rate	0.1 A	0.4 A	4.0 A	3.0 A	0.5 A
Max. outside diameter	14.55 mm	33.4 mm	33.4 mm	33.4 mm	32.05 mm
Max. height	25.15 mm	61.6 mm	61.6 mm	61.6 mm	61.7 mm
Typical weight	8.9 g	90 g	100 g	100 g	104.5 g
Operating temperature range	-60 / +85°C	-60 / +85°C	-60 / +85°C	-60 / +85°C	-40 / +150°C



https://fpm-france.fr/wp-content/uploads/2015/05/Selector-guide-lithium-BD.pdf

Saft rechargeable lithium-ion

Tension stable 3,6V [2,8V vide ; 4,2V full]

Gammes de température : -20/+60 à **30/+85°C**

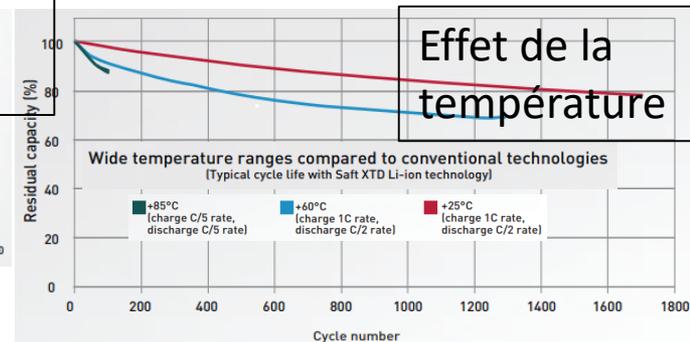
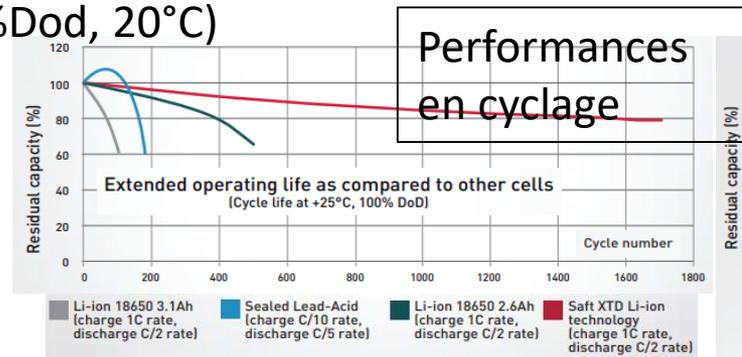
cyclage **>1500cycles** (100%Dod, 20°C)

Exemple : ref

MP 174565 3,7V 4Ah

100g, 1500 cycles

108€



Batterie vs Supercapacités

Supercapacités

Maxwell Supercap EDLC

V 2,7V/0V C 100F
 Vmax 2,85V,
 I_{max} 17 A ESR 12mOhm,
 courant de fuite 260μA
 Température -40 à +65°C
 (+85°C@2,3V)
 21,1g **17,9cm³**
 E = 365J = 0,1Wh
 500 000 cycles



Hybrid capacitor (Lic)

V 3,8/2,5V C 220F
 Vmax 4,2V, Vmin 2,2V
 I_{max} 13 A ESR 95mOhm,
 courant de fuite 5μA
 Température -15 et +70°C
 (+85°C@3,5V)
 10g **5,0cm³**
 E = 1056J = 0,3Wh
 500 000 cycles



Piles/ Accumulateur / Batterie

Li ion NCR18650

V 3,7V C 3400mAh
 Vmax 4,2V,
 I_{chmax} 1,6A, I_{dech} max 3,4 A
 Faible autodécharge
 Température -20 et +60 °C
 48g **17,3cm³**
 E = 12,6Wh = 45,3kJ
 500 cycles@C = 85%Cinit



Panasonic NCR18650B Pile rechargeable spécifique 18650
 Li-Ion 3.7 V 3400 mAh - Conrad Electronic France

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

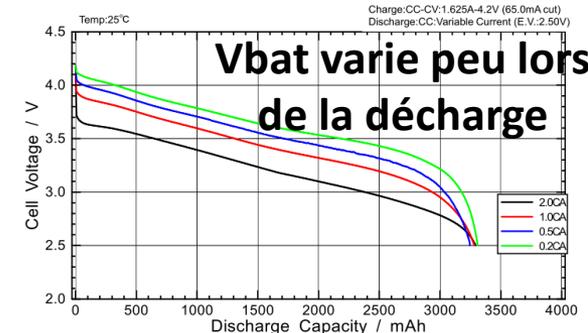
(J) (F) (V)

$$E = CV$$

(Wh) (Ah)(V)



à courant de décharge constant, V_{sc} diminue linéairement avec le temps



Batterie vs Supercapacités

Association d'éléments.

Monter la tension : mise en série
+ **BMS (battery management system)**
protection et équilibrage

Monter le courant : mise en parallèle

Supercap :

😊 Possible de faire voyager sans énergie embarquée => sécurité /
Recyclage (pollution) / **Température extrêmes** / Pic de courant
Adapté si si recharge possible régulière.

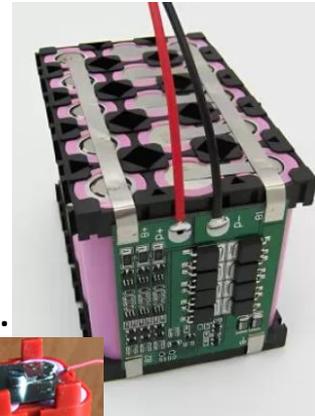
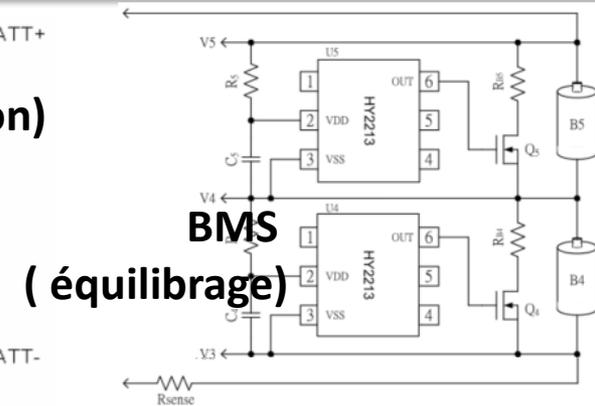
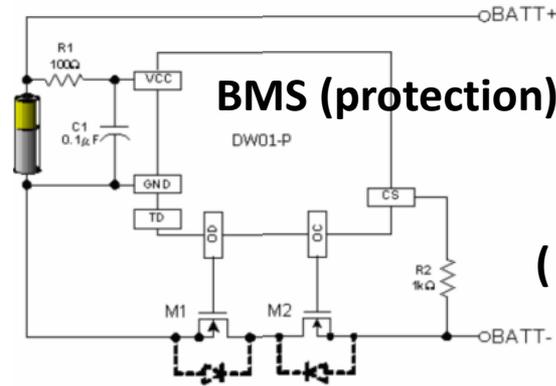
😞 Nécessite une électronique qui peut démarrer sans énergie initiale.

Batterie :

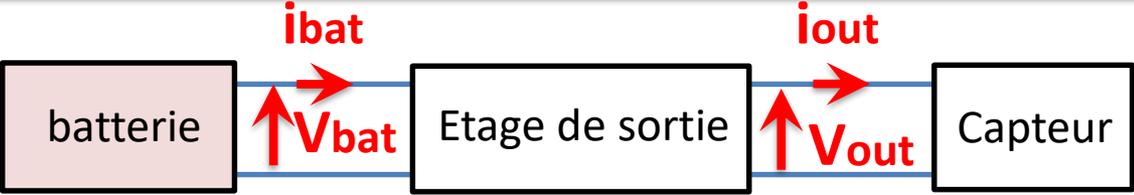
😊 Pour **applications classiques** / Rechargeable si durée longue demandée.
Démarrage immédiat, tension peu variable, énergie embarquée importante.

😞 Ne pas dépasser la tension max.

Ou tandem pour ménager la pile (cyclage sur supercap / backup pile)



Objectif: $V_{OUT} = C^{te}$



Régulateur linéaire de type LDO (Low-Dropout Linear Regulator

TPS715xx, adjustable voltage regulators LM317) $i_{bat} = i_{out}$

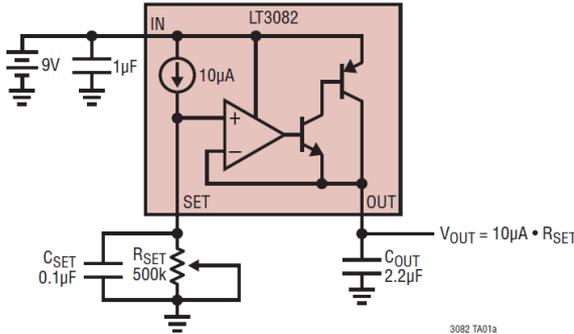
Il faut $V_{bat} > V_{out}$ et il faut $V_{bat} \approx V_{out}$ sinon η pas bon



$P_{pertes} \approx (V_{out} - V_{bat}) \cdot i_{out}$



bonne load regulation et line regulation :
 V_{out} ne bouge pas même si pic sur i_{out} ou variation de V_{bat} .



Convertisseur à découpage

$V_{bat} > V_{out}$: Elévateur (**Boost**)

$V_{bat} < V_{out}$: Abaisseur (**Buck**)

ou Buck / Boost

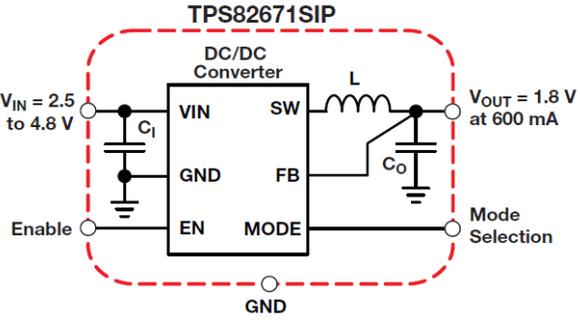


$\eta > 80\%$

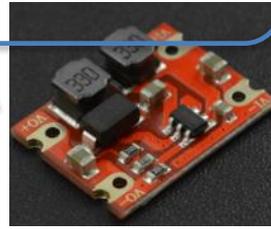
UVLO : Under Voltage LockOut : protection décharge profonde batterie

Protection : inrush current, court-circuit et température.

Mode veille / pilotable par une entrée logique



DFR0569 3€ dfrobot
 DC-DC Automatic Step Up-down
 Power Module (3~15V to 5V
 600mA)



Générateur photovoltaïque

Influence de G (W/m^2) et T ($^{\circ}C$) :

N cellules en série. $S = N \cdot S_{cell}$

$I(A)$ prop. à G et S_{cell} (m^2)

P_{MP} (W) prop. à G et S .
 $P \searrow$ si $T \nearrow$.

V_{oc} et V_{mp} varie peu avec G et T

$$\eta_{PV} = P_{MP} / (G.S)$$

Rendement η_{PV} valeur typique **20%** @STC
conditions STC : 1000 W/m^2 , 25 $^{\circ}C$ et spectre solaire AM1.5 (1,5 épaisseur d'atmosphère)

Beau temps : 1000 W/m^2

Mauvais temps hiver : 20 W/m^2



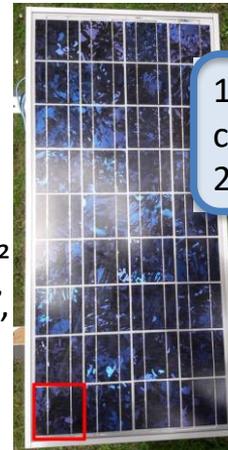
Panneau MSX-005 0,5Wc 150mA



10Wc, 14x24 cm^2

40Wc,
40x90 cm^2
22V, '12V',
3A

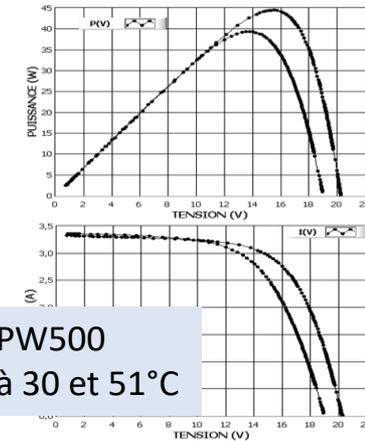
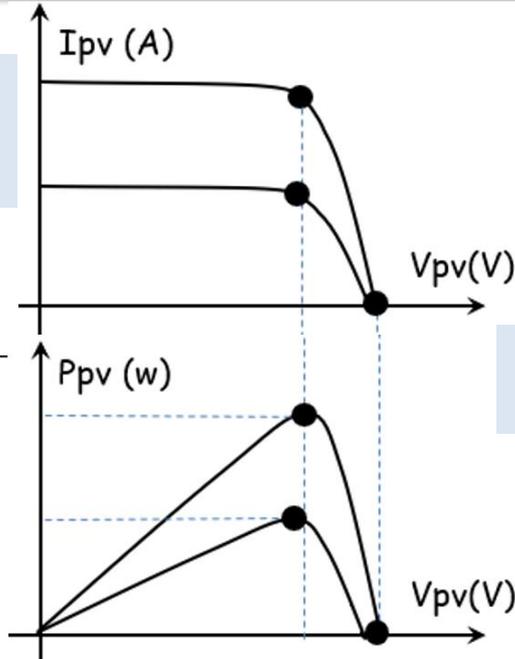
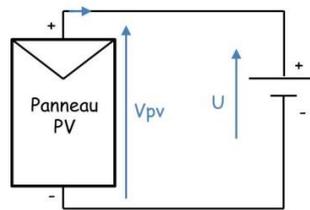
10x10 cm^2



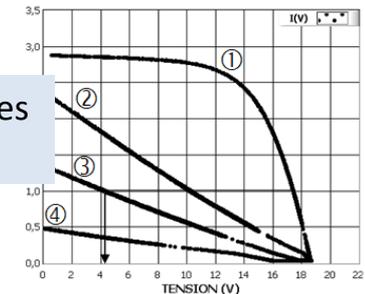
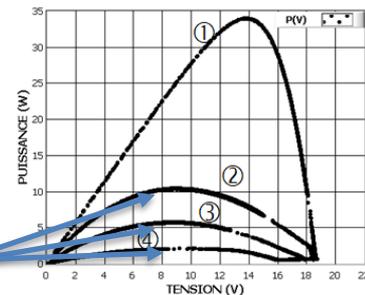
1 cellule
cachée,
2 et 4

Ombrages
partiels

Influ
Irradiance
 G et $G/2$

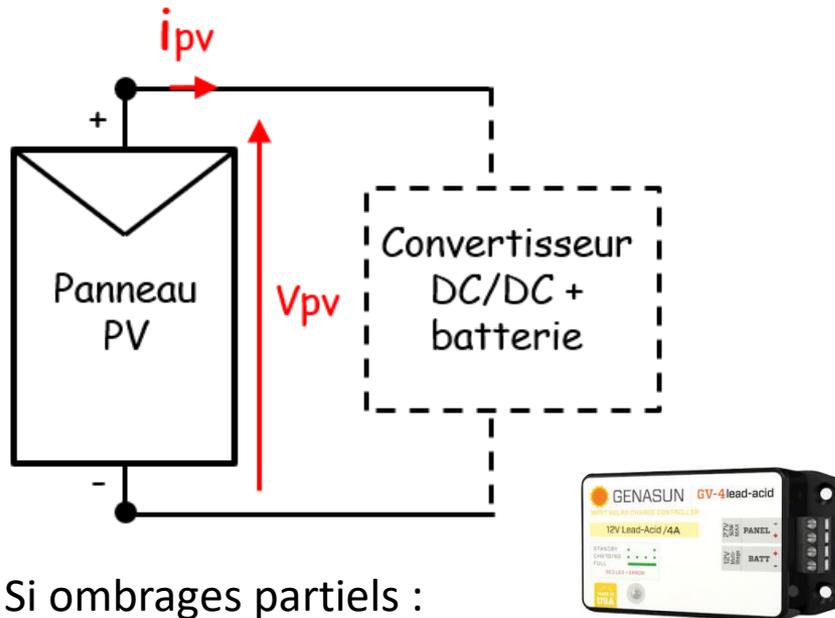


PW500
à 30 et 51 $^{\circ}C$



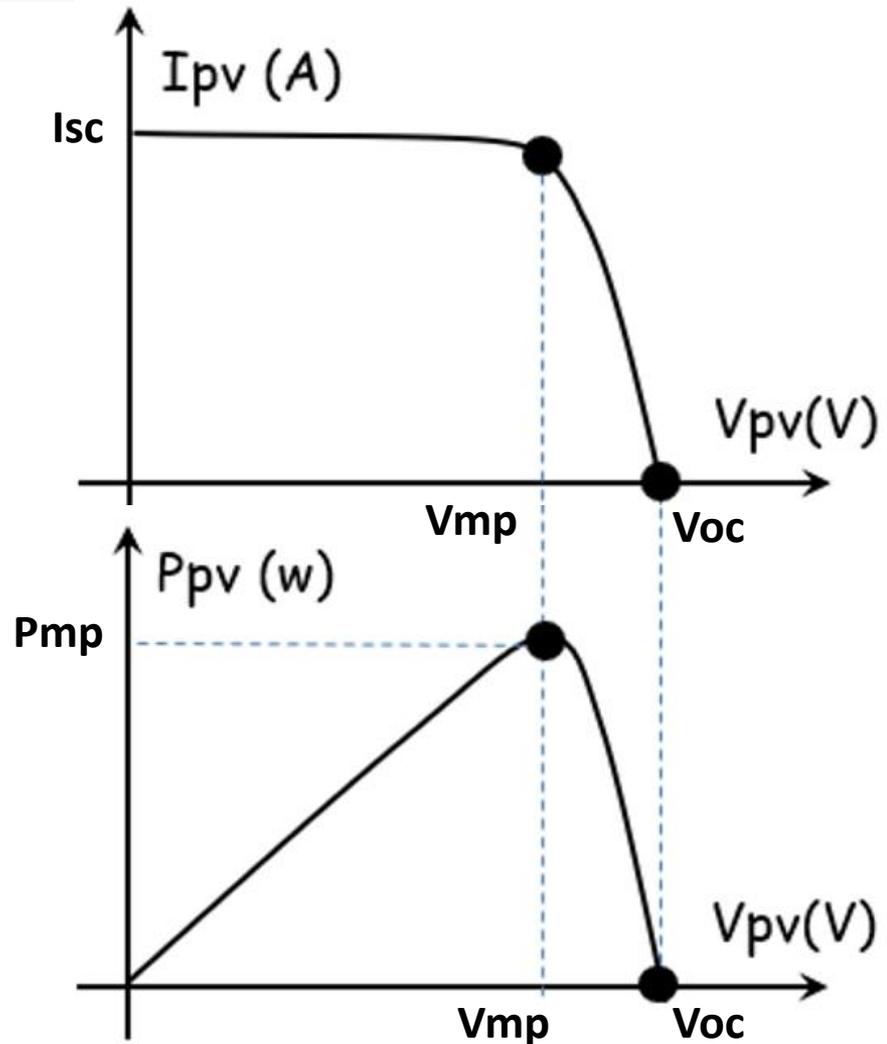
MPPT Les plus classiques

- * Régul V_{pv} à une valeur cste,
- * Fraction V_{oc} ($V_{mp} = 80\%V_{oc}$),
- * P&O (oscillation autour de PMP)
ex : Genasun Genasun GV-4
(lead-acid, PV 50W, out 12V, 4A)

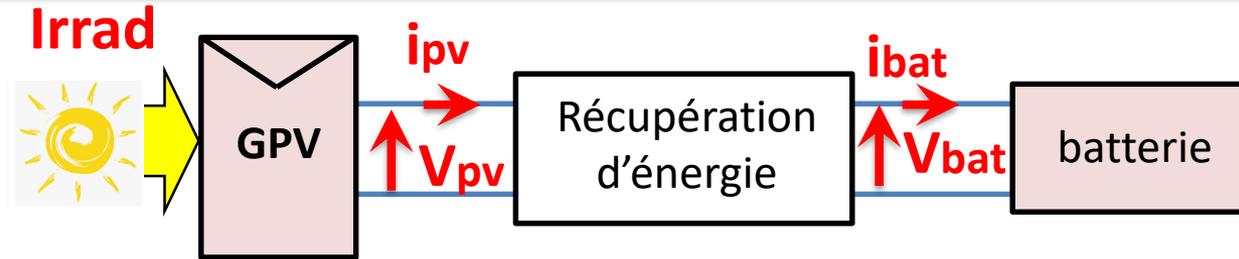


Si ombrages partiels :
GMMPT (cf recherche)

<https://genasun.eu/>

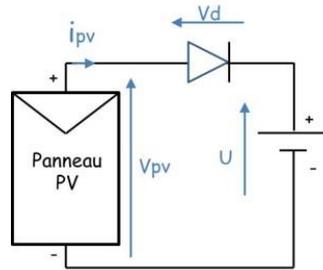


Objectifs :
Récupération énergie PV
+ Protection batterie.



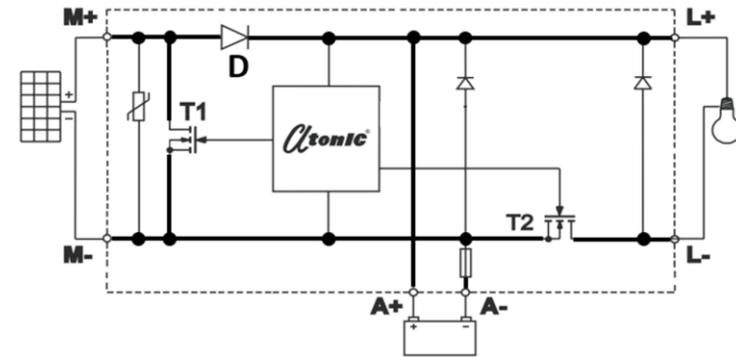
Basique

Juste une diode
anti-retour



Régulateur Shunt

Steca Solsum

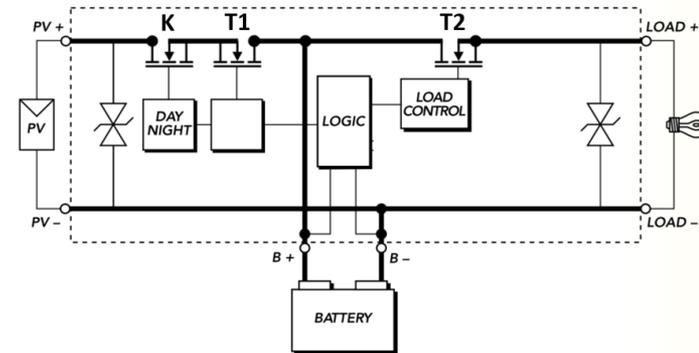


PWM controller

V_{pv} voisine de V_{bat}
régulateur simple
(série ou shunt)

Régulateur Série

*Mornigstar
SolarLight10*



MPPT controller (buck ou boost)

(il fixe $V_{pv} / P = P_{max}$ en mode MPPT)

V_{pv} indépendante de V_{bat}

BQ24650 buck (V_{pv} 5V à 28V; MPPT regul V_{pv})

les solutions de récupération de l'énergie présentées ici ne fonctionnent pas lorsque le soleil est faible => vraiment pas optimal!

LDO alimenté par un panneau PV. Il régule



sa tension de sortie

fonctionne si assez de soleil mais sinon ça ne fonctionne pas.

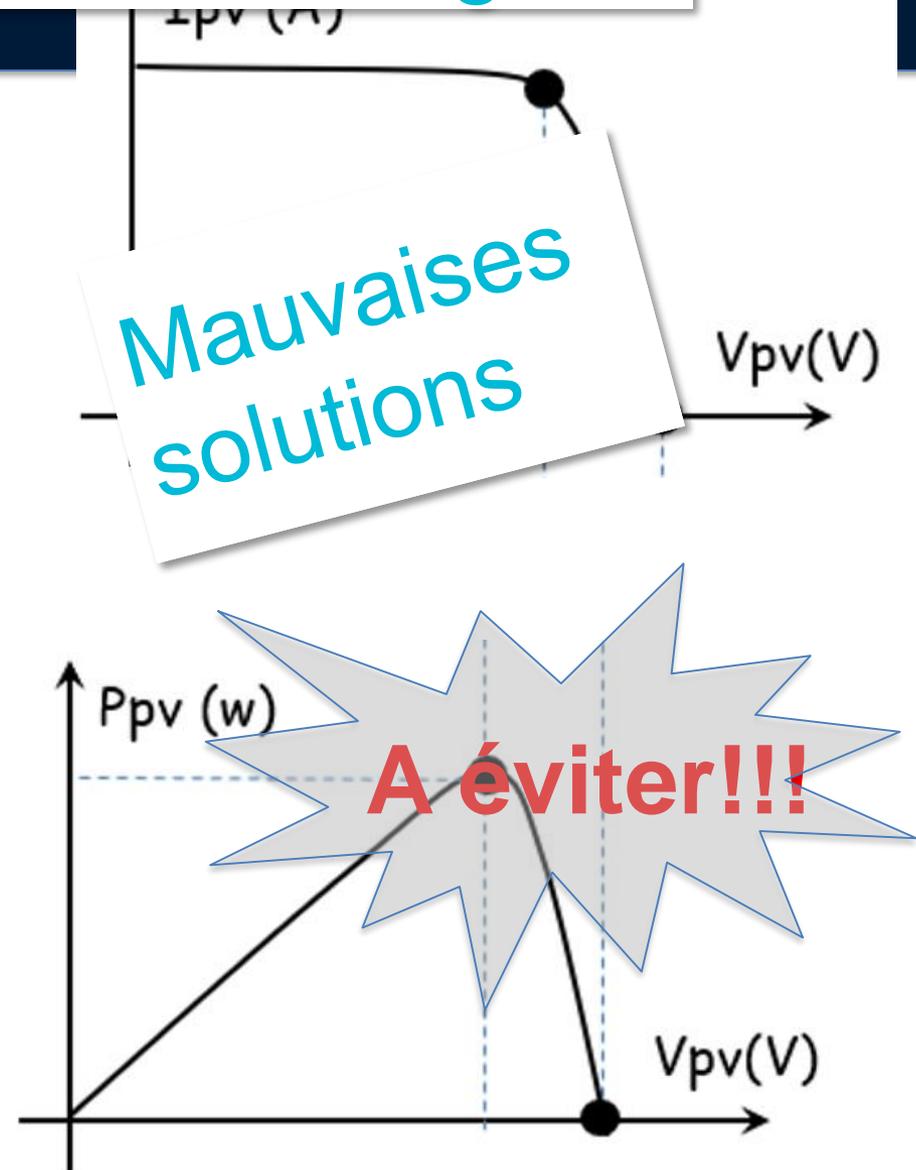
DC/DC buck ou boost qui régule

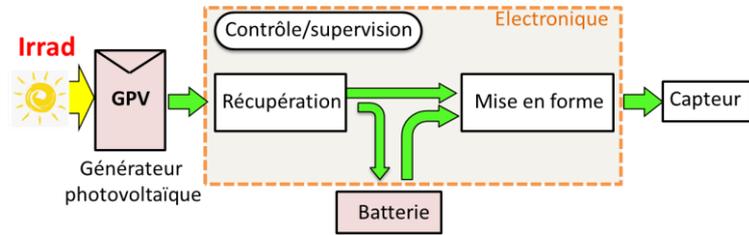
sa tension de sortie

utilisé entre le panneau et la batterie



ça peut fonctionner mais mauvaise solution





Petite puissance (0,5W max, batterie ou supercapacités):
BQ25504 / BQ25570 / SPV1050

Plus de puissance : SPV1040 (boost 3W, 5,2Vout V in 0,3 à 5,5V)

Régulateur simple et robuste :

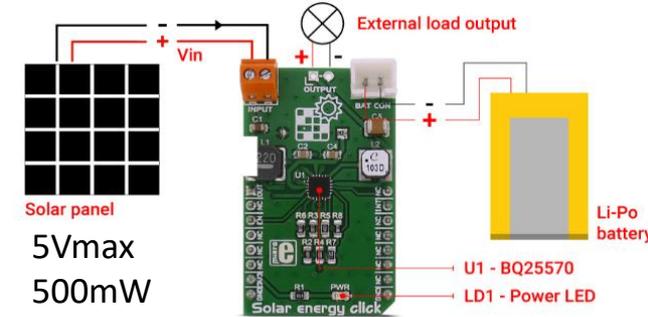
Steca Solsum0606 régulateur série 12V ou 24V, no MPPT.

Victron Blue solar (no MPPT) Smartsolar (MPPT)

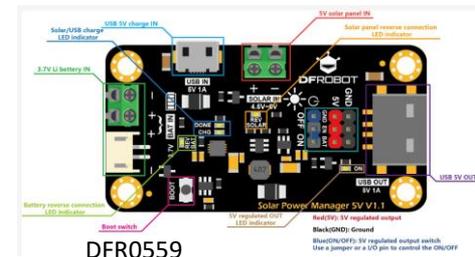
dfrobot DFR0559 (4W regul linéaire) DFR0535 (10W regVpv)

Contrôleurs de charge solaire MPPT et PWM

solar energy click BQ25570 (MPPT fraction de Voc)
2,6V 100mA



<https://www.steca.com/>

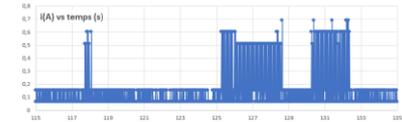


Méthode :

Analyse gisement solaire (PVGIS / SoDa / NASA power)
données journalières et/ou horaires d'irradiance



Analyse consommation ⇒ Mesures I, V labo ou sur site
⇒ Estimation (bad!)



Estimation (ou mesure) des rendements des étages de conversion

- Solar Charge Efficiency (18V SOLAR IN): 78%@1A; 72%@1.8A



Bilan E/S au niveau de la batterie (journalier ou horaire)

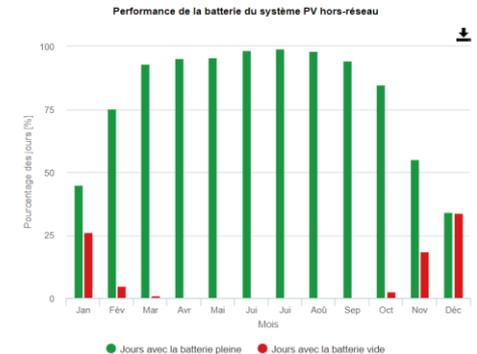
$$E_{\text{utilisable/jour}} = \left(I_{\text{Soleil /jour}} \times S_{\text{PV}} \right) \times \eta_{\text{pv}} \times \eta_{\text{MPPT}} \times \eta_{\text{Chargeur Batt}} \times \eta_{\text{Batt}} \times \eta_{\text{DC/DC sortie}}$$

Wh Wh/m² m²

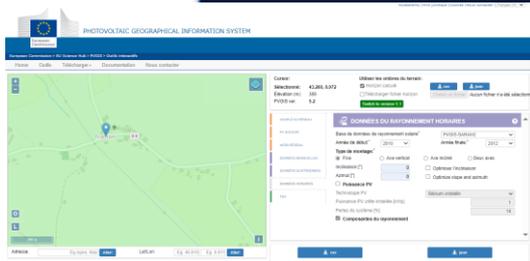
$$E_{\text{CONSO}} = 21\text{Wh} \quad E_{\text{batt } n} = E_{\text{batt}(n-1)} + E_{\text{utilisable/jour}} + E_{\text{CONSO}}$$

Analyse des résultats : Choix de S_{PV} , de E_{BATT} (C_{BATT} et V_{BATT})

Choix : panneau (P_{mp} , V_{oc} , V_{mp} , I_{sc}),
batterie (C , V), chargeur batterie (V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out}),
régulateur sortie (V_{in} , I_{in} , V_{out} , I_{out})



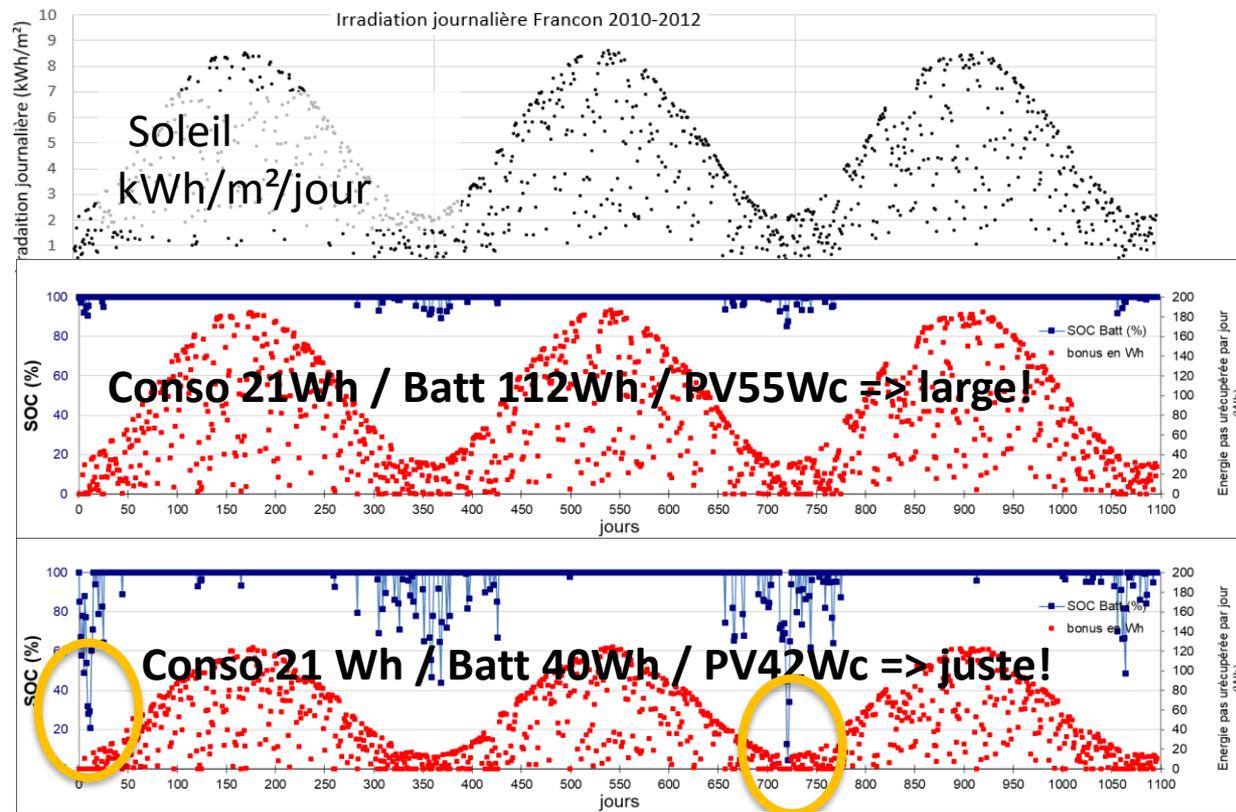
Exemple de dimensionnement



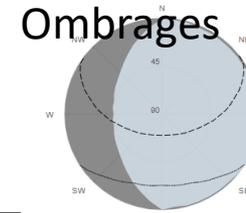
PVGIS (Lieu) → Données horaires (W/m^2), avec ou sans ombrages + (conso + Spv + Ebat) → Excel ⇒ SOC batt

ou

PVGIS (Lieu, avec ou sans ombrages + (conso + Spv + Ebat) ⇒ N jours de défaillance (SOC batt < seuil)



Ombrages



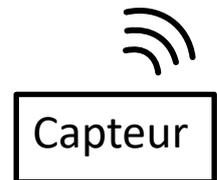
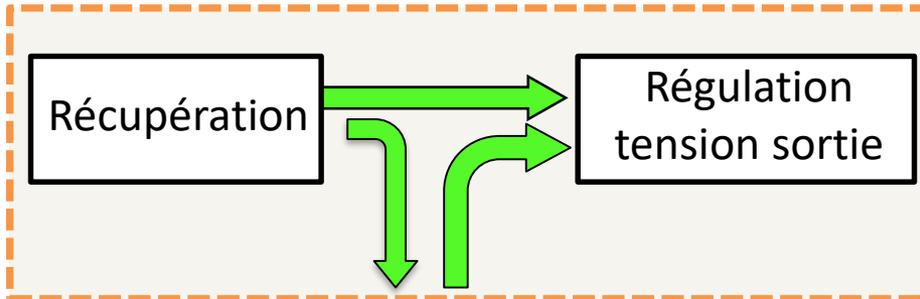
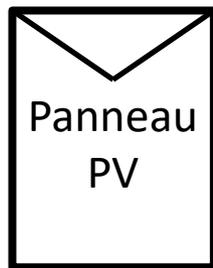
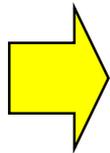
Aquacosme / projet Econect



Récapitulatif - Conclusion

2. Gisement

irradiations solaire journalière ou horaire (avec ou sans prise en compte des ombrages simples)



1. Conso

$V_{c\text{apt}}$, courant max énergie horaire ou journalière

3. Modélisation: valeurs de η des différents étages (PV, pilotage panneau, récupérateur énergie, batterie et régulateur de sortie)

4. Simulation: Que devient le SoC de la batterie?

On affine pour trouver S_{pv} et E_{bat} tels que S_{oc} toujours sup à $S_{oc\text{ mini}}$



5. Recharge : $S_{pv} \Rightarrow P_{\text{max pv}}$ et $V_{oc\text{ pv}} \Rightarrow$ choix du panneau

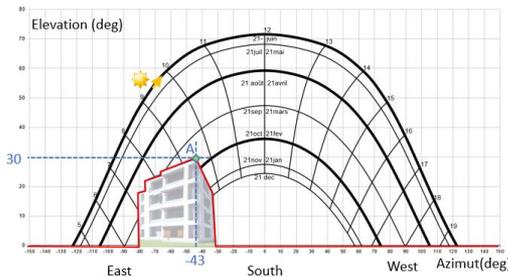
6. Autonomie : $E_{bat} \Rightarrow V_{bat}$ et $C_{bat} \Rightarrow$ choix batterie

7. Topologie (DC/DC recup ou regul shunt) et syst de regul de sortie (LDO ou DC/DC), soit en éléments séparés soit all in one.

Retour étape 3 pour affiner la simulation

Objectif : méthode simple pour choisir batterie et panneau solaire en cas d'ombres complexes.

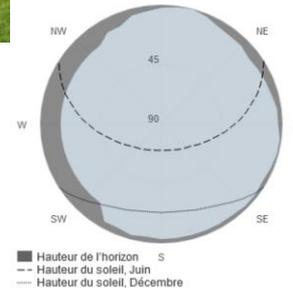
ombres simples.



Idée: photofish-eye + traitement numérique de la photo => diagramme d'ombrage
Puis calcul impact ombrage



Projet Econect
Ph.: M. Cauchoix



Difficultés : étalonnage smartphone
/ trouver le ciel
/ arbres à feuille caduque ou pas /
projet open-source

Thèse Kha Bao Khanh CAO

Projet MERMOZ prévision de la production PV sur un drone reliant **Toulouse** à **Natal**. (H2+PV)



AÉROPOSTALE



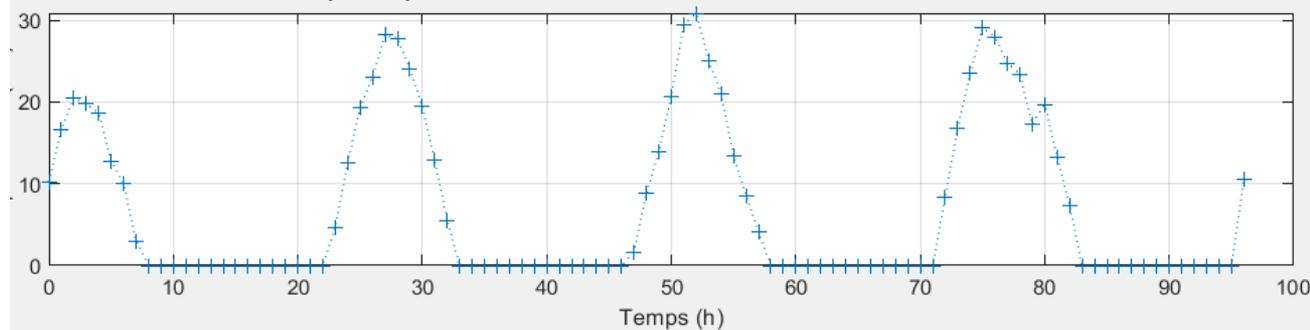
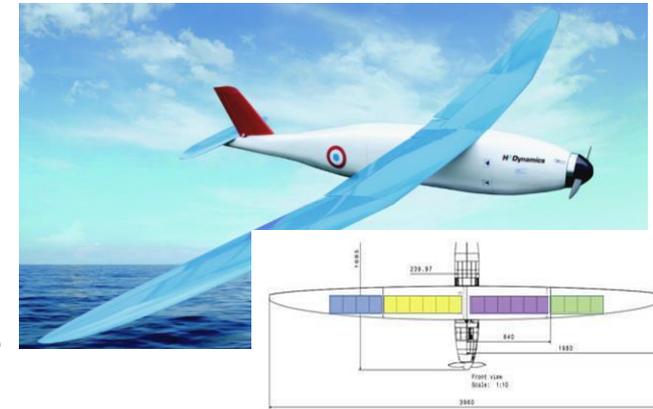
POSTE-PASSAGERS-MESSAGERIES
S'ADRESSER AU BUREAU DE RENSEIGNEMENTS DE LA GARE

Données météo sur 20 ans (NASA)
+ Modèle énergétique
Simulateur de vol

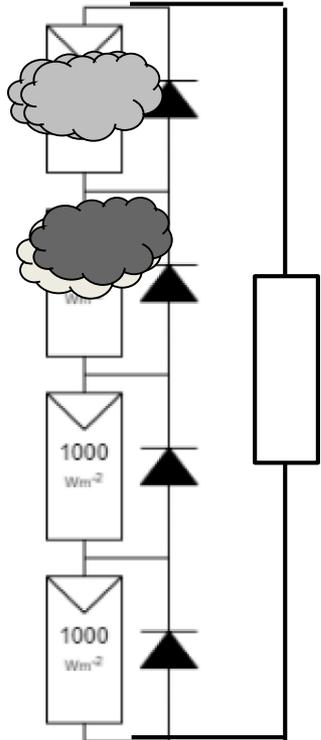


Energie récupérée par heure (Wh)

Vit = 23 m/s Envergure = 4m



Collaboration avec Vincent Mahout

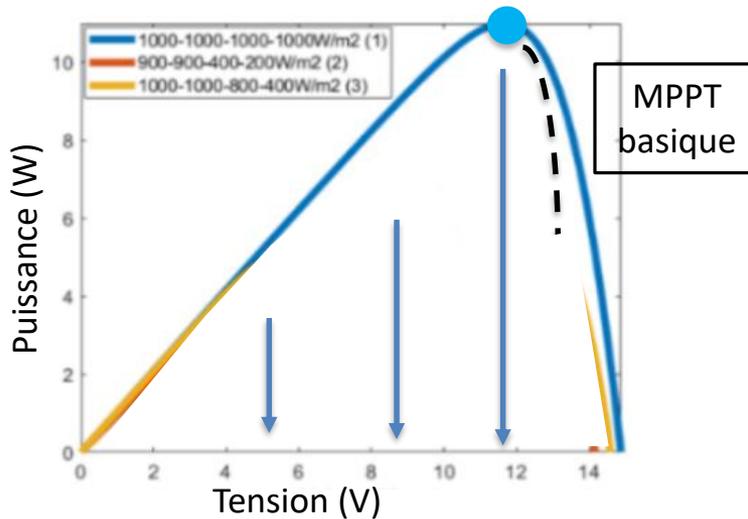


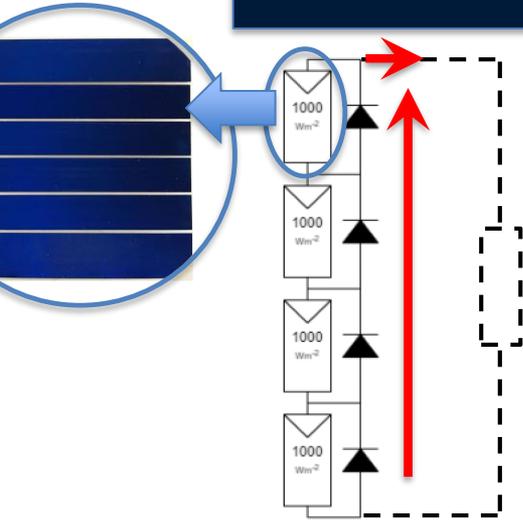
Problématique : En présence d'ombrages variables : Comment trouver Pmax rapidement?

Hypothèse :

Zones distinctes de tension où se situent les pics de puissance.

Est-ce valable quelles que soient les combinaisons des valeurs d'irradiance?





1ère étape : Modélisation

Modèle à une diode pour la cellule PV + Modèle diode classique
+ Utilisation des fonctions de Lambert [$I = f(V,G,T)$]

⇒ $I(V)$ @ G,T par cellule,

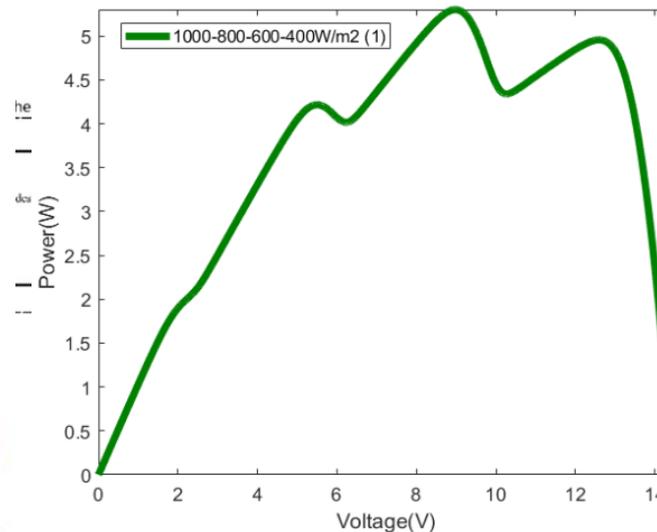
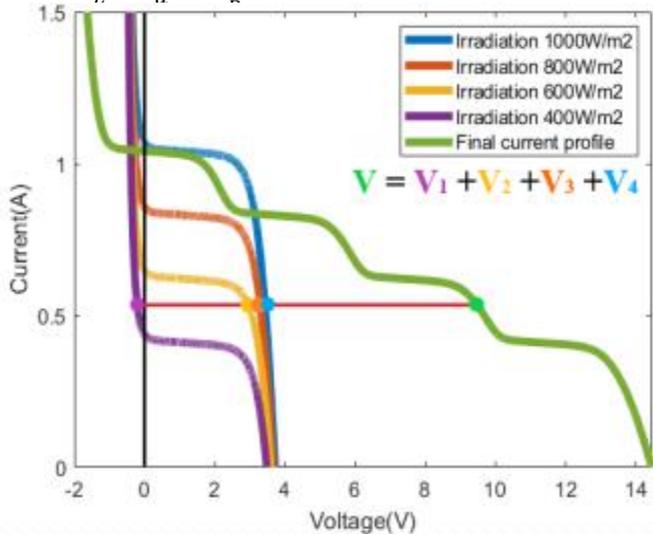
Interpolation donne $V(I)$ @ G,T +

Mise en série :

sommation des tensions

⇒ $I(V)$ et $P(V)$ du panneau
@ différents G_n, T_n $n=1$ à 4 .

$$I = I_L - I_d - \frac{V + IR_s}{R_s}$$



Temps de calcul pour
une caractéristique
9μs contre **0,7s**
avec Simulink
(ratio de **80 000**)

2ème étape : Analyse

Utilisation du modèle :

Analyse des différents cas possibles en faisant varier les irradiances et pour plusieurs températures.

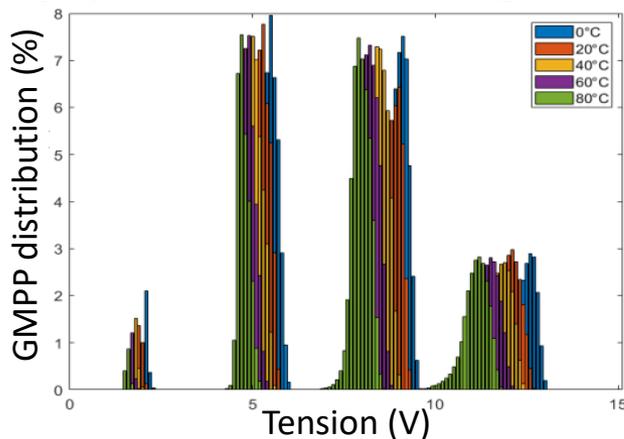
⇒ **Distribution des valeurs de tensions pour lesquelles le maximum de puissance est atteint.**



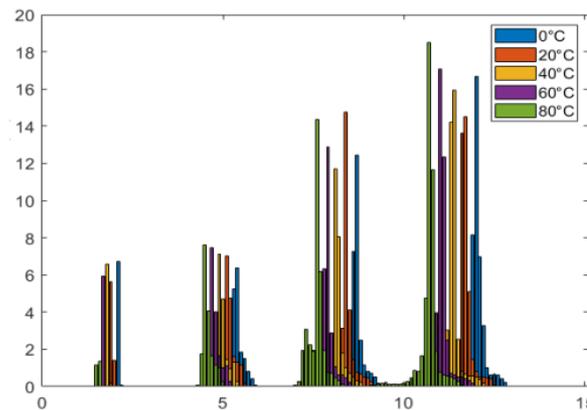
3ème étape : commande GMPPT

Principe de l'algorithme choisi :
détection de ΔP ,
pas de balayage complet mais
test sur 3 points (1 dans chaque
zone), puis P&O classique pour
assurer la convergence :

Equiprobabilité des configurations



Cas réel.



97% de succès!

Thèse Kha Bao Khanh CAO

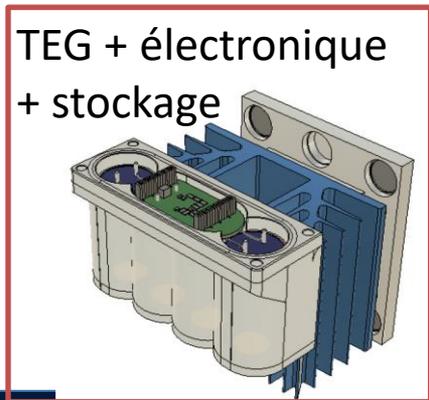
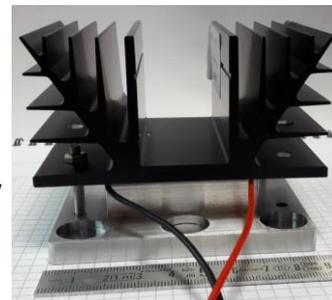
Une alimentation sans batterie monobloc pour alimenter des capteurs sans fils très énergivores

thermogénérateur (TEG)
 + électronique de récupération (SPV1040)
 + stockage (supercapacités) + gestion énergie

Contraintes : support à 250 °C / air ambiant à 60°C / poussières / gravats / gaz.

Aujourd'hui tenue à 80°C et électronique déportée
Objectif : tenue à 125°C et ensemble intégré, sans entretien.

Verrous : Modélisation d'un environnement thermique complexe + Stockage haute température.



Mesure O2
 Cokerie Fos/Mer
 2021-2024

Merci de votre écoute.
Si vous avez des questions ...