

# Émulateur photovoltaïque *open-source*

---

Gabriel Ceolin de Brito  
[gabriel.ceolindebrito@student-cs.fr](mailto:gabriel.ceolindebrito@student-cs.fr)

# GITHUB

---

## Introduction



# QUI SUIS-JE ?

## Introduction



- Génie électrique à **l'Université Fédérale de Santa Catarina** (Brésil)
  - Depuis 2021
- Double-diplôme à **CentraleSupélec**
  - Depuis 2024
- M2 Physique et Ingénierie de l'Énergie à **l'Université Paris-Saclay**
  - Depuis 2025
- Stage au laboratoire **GeePs**
  - Été 2025



# OBJECTIF DE LA SÉANCE

---

## Introduction

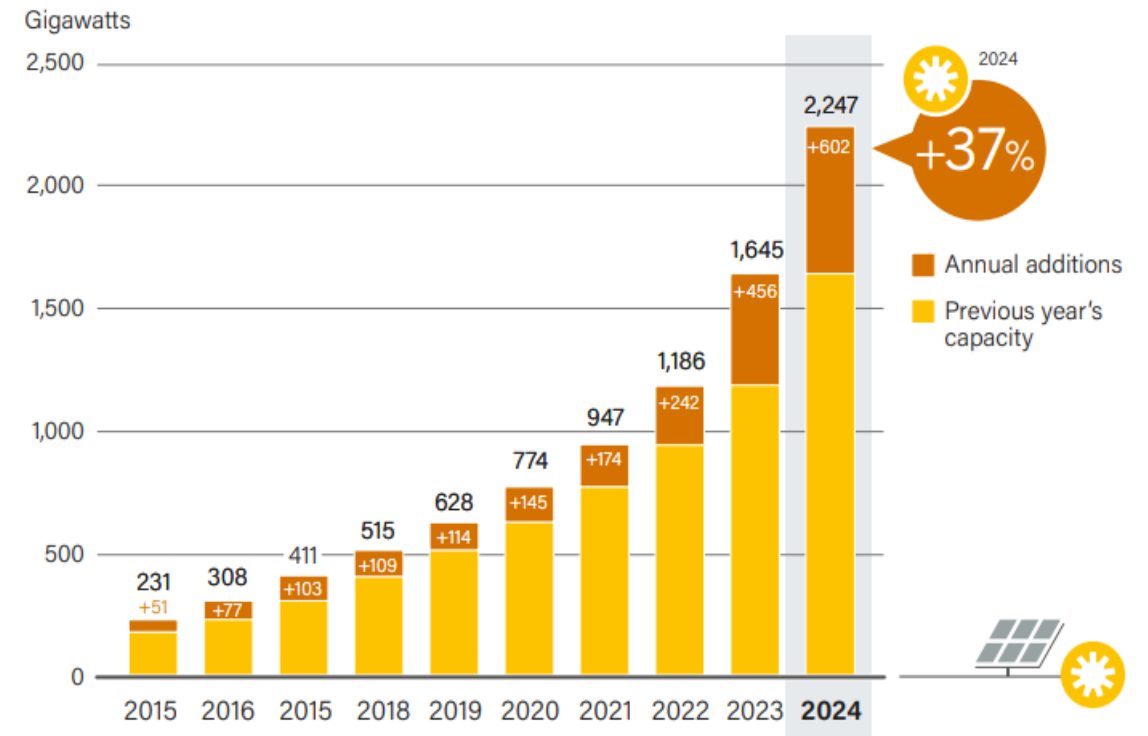
**Présenter un émulateur  
photovoltaïque *open-source* basé  
sur OwnTech**

# POURQUOI ?

## Introduction

- **Lien direct avec l'actualité énergétique**
  - Tendance mondiale du photovoltaïque et l'électronique de puissance
  - Forte demande pour des ingénieurs spécialisés
- **Application concrète**
  - Électronique de puissance appliquée à un système réel
- **Travail interdisciplinaire**
  - Modélisation, électronique, commande, programmation embarquée, etc

Figure 1 - Capacité globale et additions additionnelles [1].



[1] [https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/pdf/supply/GSR\\_2025\\_Factsheet\\_Supply\\_SolarPV.pdf](https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/pdf/supply/GSR_2025_Factsheet_Supply_SolarPV.pdf)

# À LA FIN DE LA SÉANCE VOUS ALLEZ

---

## Introduction

- Connaître les principaux concepts du **photovoltaïque (PV)**
- Connaître les principaux concepts de l'**électronique de puissance (EP)**
- Être capable d'expliquer ce qu'est un **émulateur PV** et son importance
- Savoir **utiliser l'émulateur PV** *open-source*
- Savoir **tracer la courbe caractéristique** d'un panneau PV
- Comprendre l'**importance** du PV, de l'EP et de l'*open-source*

# PLAN

---

- Introduction **(10 min)**
- Partie théorique **(1h40)**
  - Notions de base du photovoltaïque (PV)
  - Notions de base de l'électronique de puissance (EP)
  - Émulateur PV *open-source*
- Préparation pour le TP **(20 min)**
  - Consignes
  - Branchement du système
  - Installation du *firmware*
- **Pause (15 min)**
- Partie pratique **(1h40)**
- Évaluation **(15 min)**

# PARTIE THÉORIQUE

---

## Notions de base du photovoltaïque



**Qui a découvert l'effet  
photélectrique ?**

# HISTORIQUE DE L'EFFET PHOTOÉLECTRIQUE

## Notions de base du PV

- **Edmond Becquerel (1839)**
  - Découvre l'effet photoélectrique interne (**effet photovoltaïque**)
  - Cellule photovoltaïque électrochimique (pile photovoltaïque)
- **Heinrich Hertz (1887)**
  - Observe l'effet photoélectrique externe
- **Albert Einstein (1905)**
  - Explique l'effet photoélectrique externe
  - Prix Nobel

Figure 2 – Edmond Becquerel [2].



[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond\\_Becquerel](https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel)

# EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

## Notions de base du PV

Figure 3 – Substrats N et P [3].

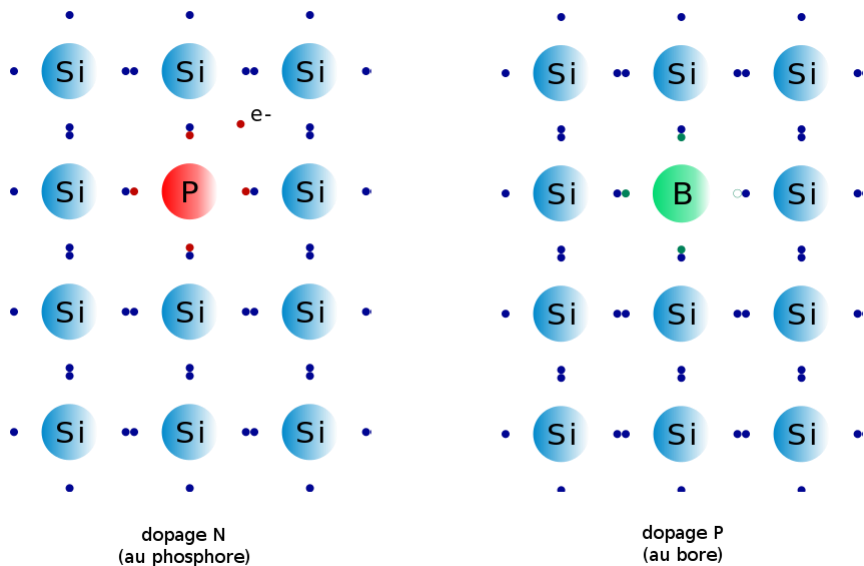
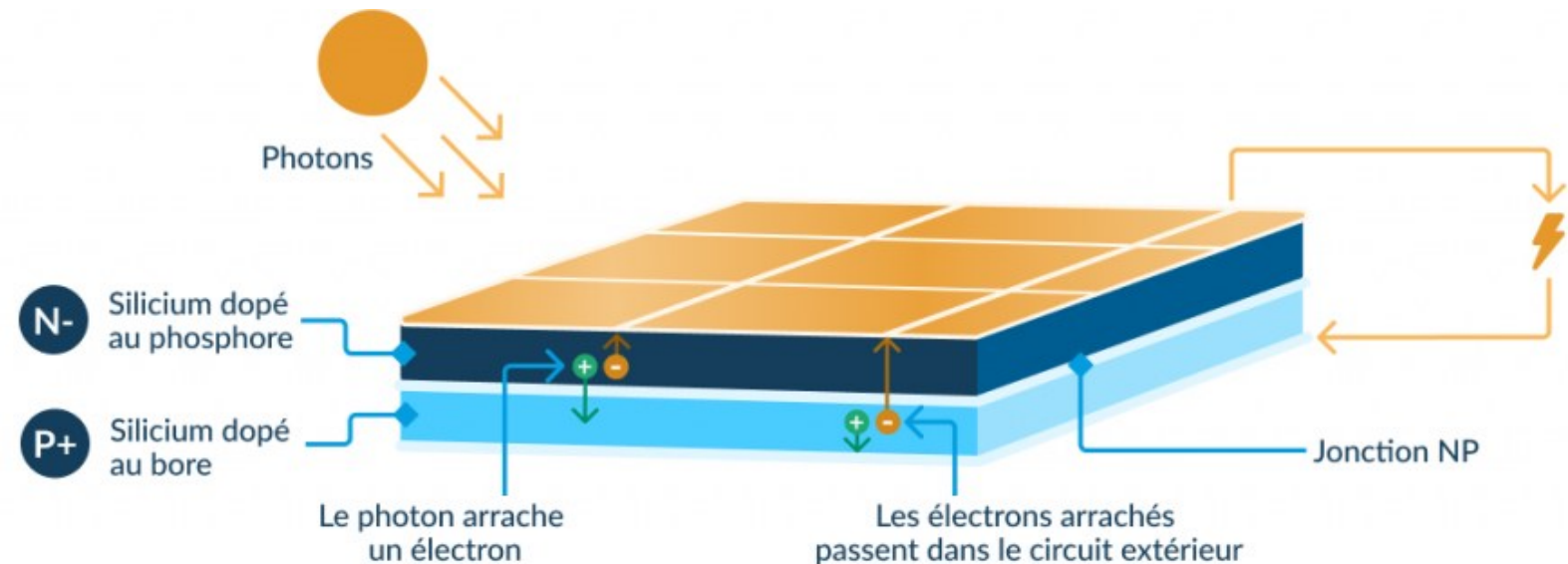


Figure 4 – L'effet photovoltaïque [4].



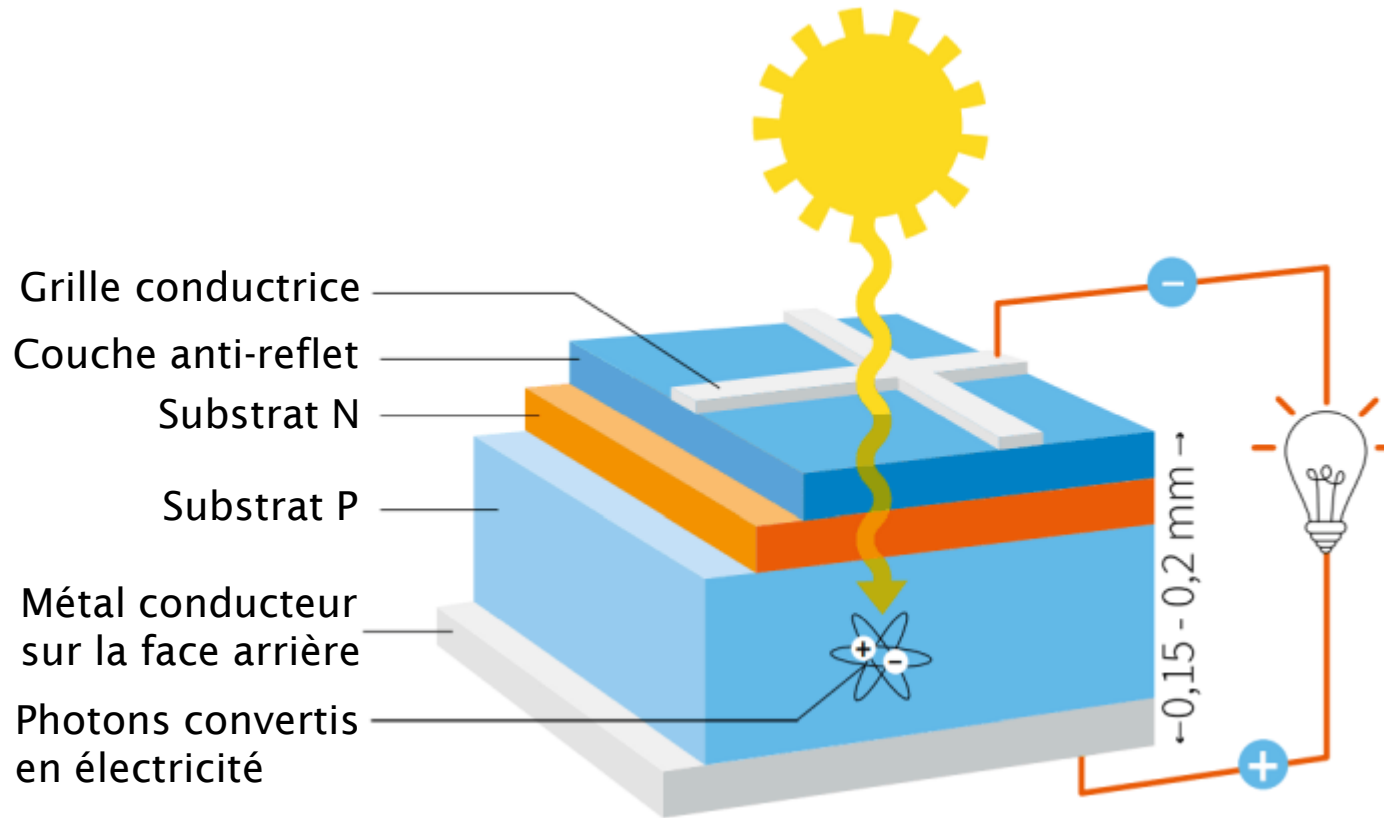
[3] <https://couleur-science.eu/?d=10d2d2--cest-quoi-un-semi-conducteur>

[4] <https://mon-panneau-solaire.info/panneaux-solaires/cellules-photovoltaïques/>

# CELLULE PV

## Notions de base du PV

Figure 5 – Structure d'une cellule PV [5].

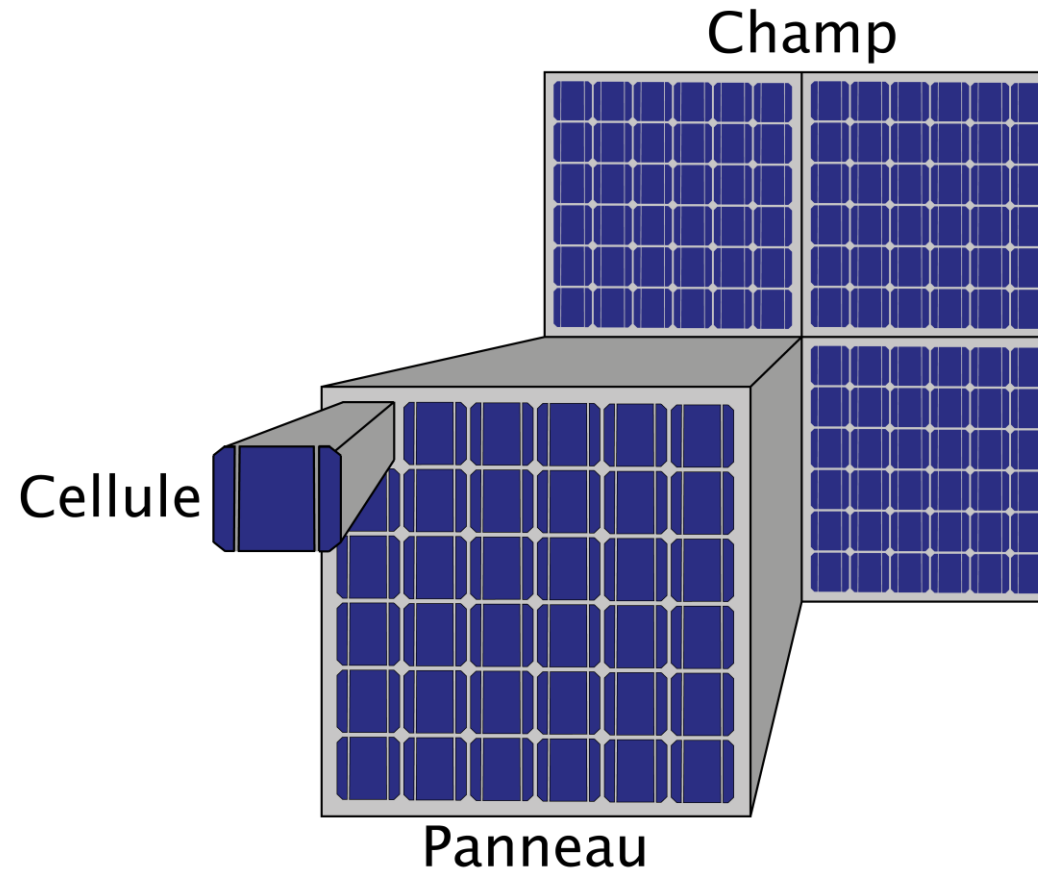


[5] <https://conseils-thermiques.org/contenu/fonctionnement-panneau-solaire.php>

# PANNEAU PV

## Notions de base du PV

**Figure 6** - Définition conceptuelle de cellule, module et champ photovoltaïque.



# PRODUCTION PV

---

## Notions de base du PV

- La production photovoltaïque dépend principalement de trois facteurs principaux :
  - L'**irradiance**
  - La **température**
  - La **masse d'air**

# IRRADIANCE SOLAIRE

## Notions de base du PV

- $S$  – Irradiance solaire [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- Puissance reçue du soleil par unité de surface
- Dépend principalement de :
  - L'**orientation** des modules PV
  - **Localisation**
  - **Moment** de la journée (heure)
  - L'**environnement**
- À l'échelle macroscopique, elle affecte principalement le **courant de sortie** de la cellule

Figure 7 – Irradiance journée ensoleillée [6].

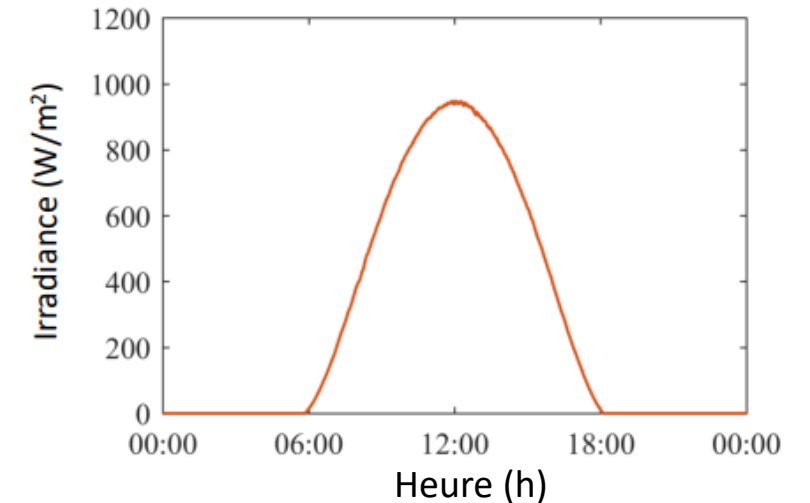
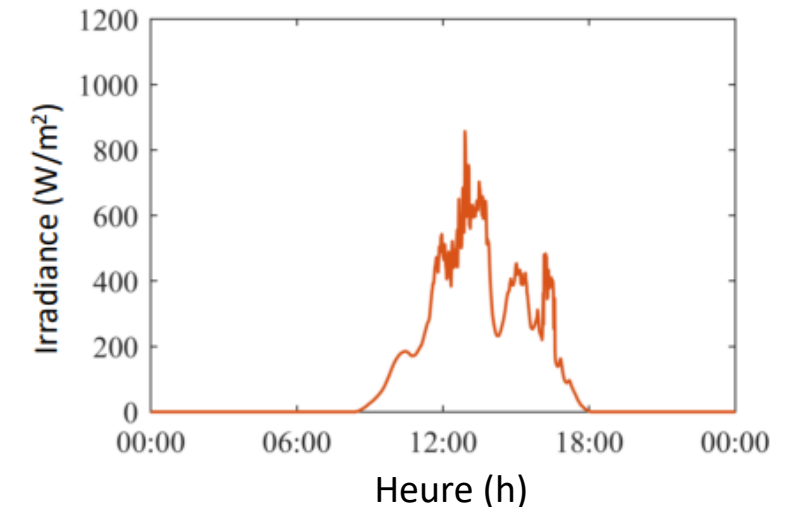


Figure 8 – Irradiance journée nuageuse [6].

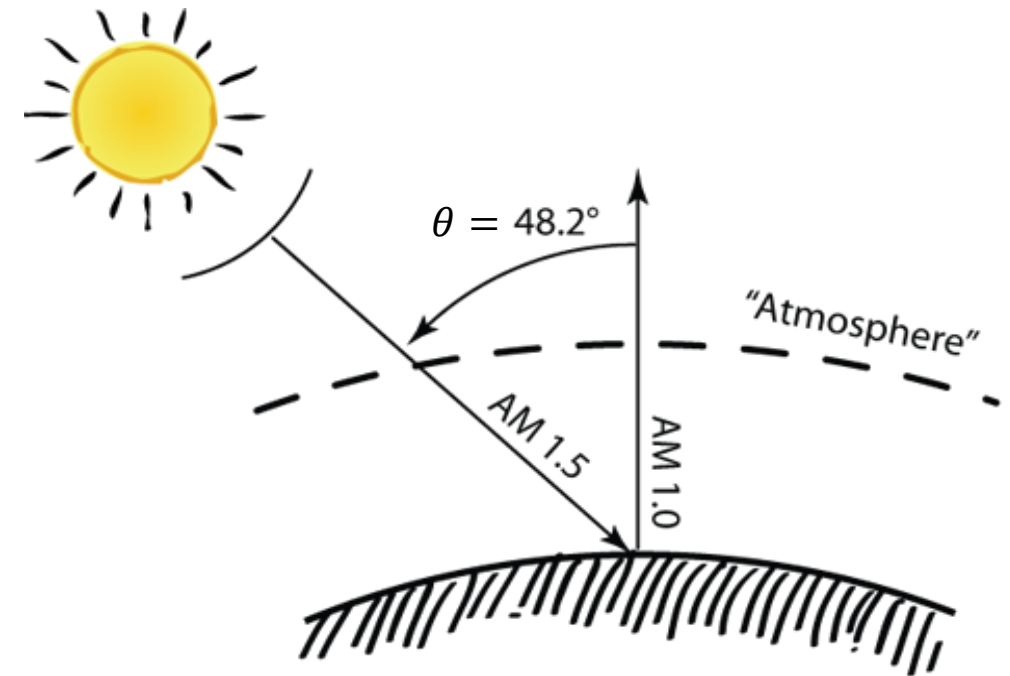


# MASSE D'AIR

## Notions de base du PV

- **AM** – *Air Mass* [-]
- L'épaisseur de la couche d'air traversée par le rayonnement solaire dépend de **l'inclinaison du Soleil**
- Cette variation **influence le chemin parcouru par la lumière** dans l'atmosphère
- Normalisation du **trajet parcouru par la lumière solaire** dans l'atmosphère par rapport au trajet minimal possible
- $AM \approx \frac{1}{\cos(\theta)}$

Figure 9 – Géométrie de l'indice AM [7].



[7] <https://courses.ems.psu.edu/eme810/node/469>



# TEMPÉRATURE

---

## Notions de base du PV

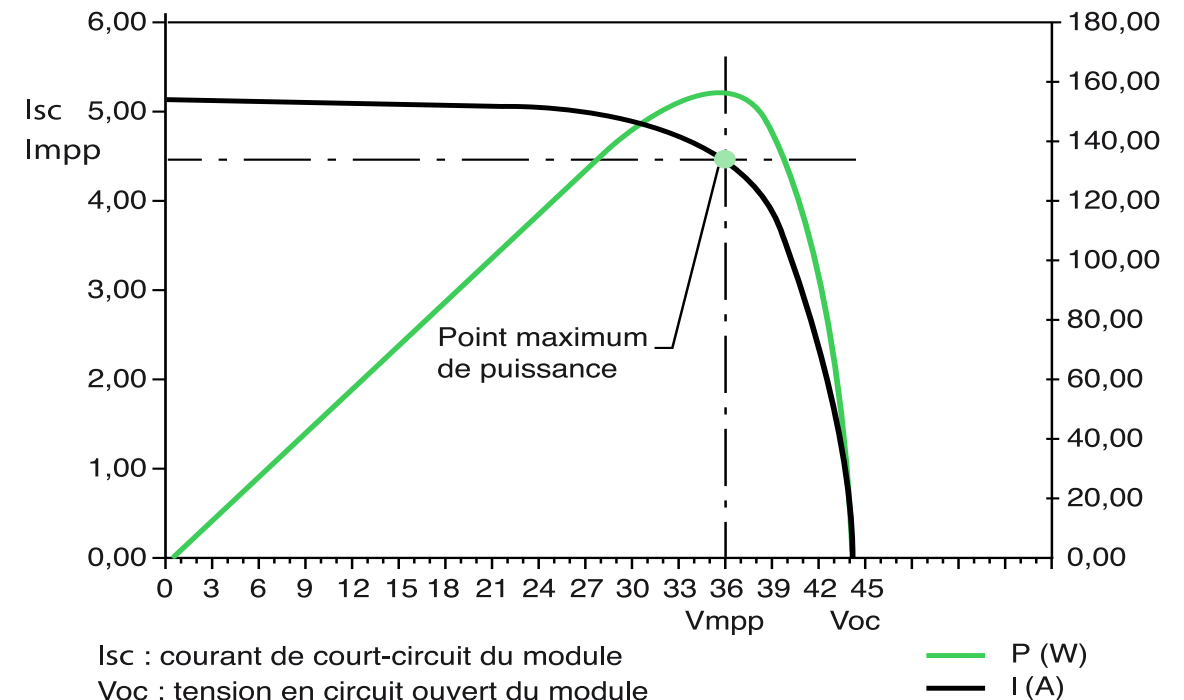
- **$T$**  – Température de la cellule ou du module PV [**°C ou K**]
  - **Ne doit pas être confondue avec la température de l'environnement  $T_{amb}$  !**
- Un **facteur déterminant** pour la génération PV
- Liée à la **concentration de porteurs** dans le cristal de silicium
- À l'échelle macroscopique, elle affecte principalement la **tension de sortie** de la cellule

# COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE

## Notions de base du PV

- **Courbe I-V** caractéristique
- **Courbe de puissance**
- Toute variation des conditions (***S*** et ***T***) entraîne une **modification de la courbe I-V**
- **3 points** caractéristiques
  - **$V_{oc}$**
  - **$I_{sc}$**
  - **$V_{MPP}$  et  $I_{MPP}$**

Figure 10 – Courbe caractéristique I-V et courbe de puissance d'un panneau PV [8].

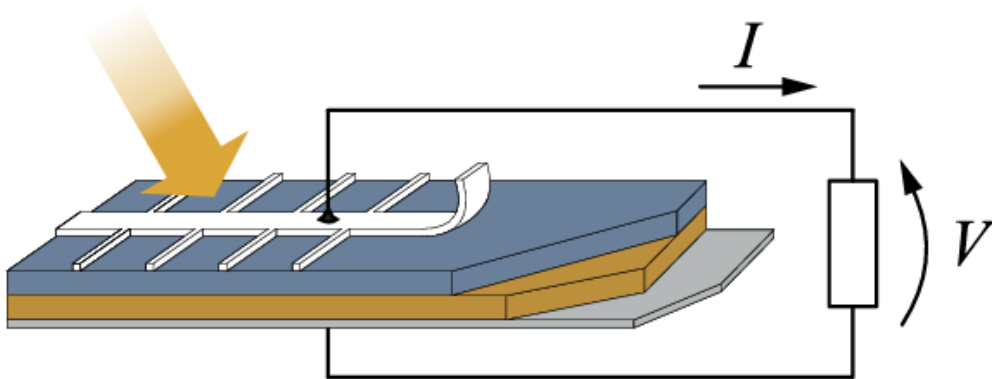


[8] [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe\\_et\\_technologie\\_photovolta%C3%AFque](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe_et_technologie_photovolta%C3%AFque)

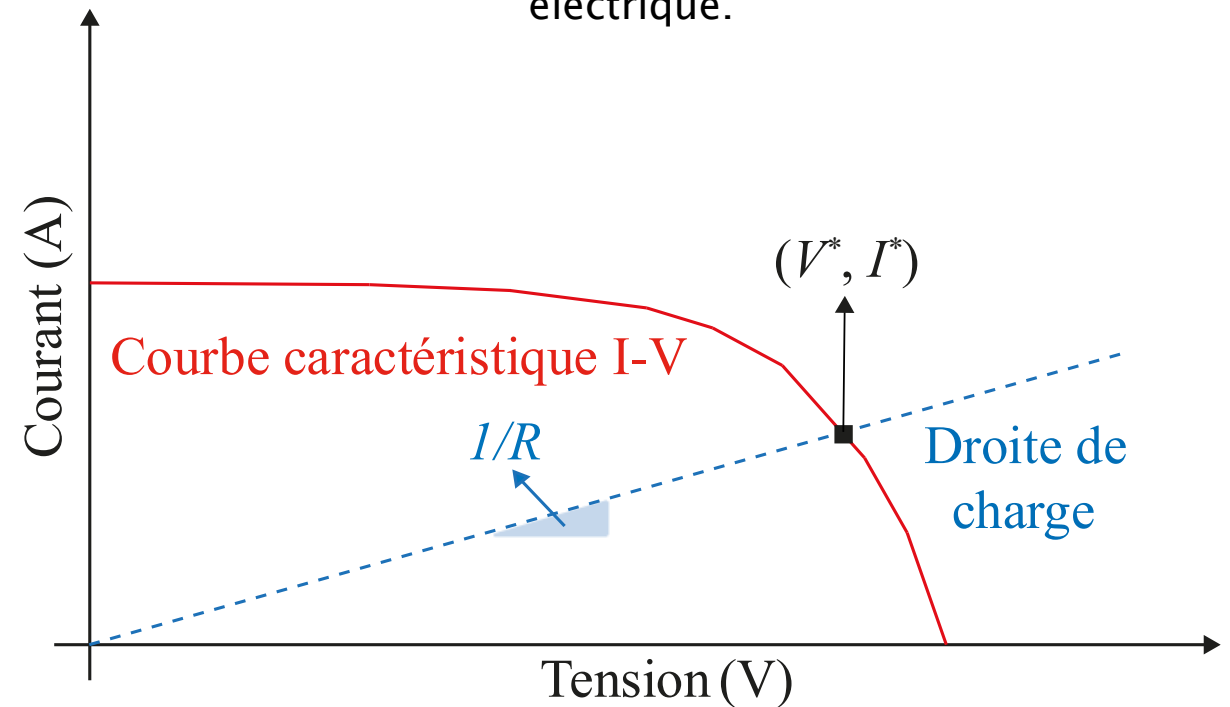
# COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE

## Notions de base du PV

**Figure 11** – Panneau PV connecté à une charge résistive  $R$  [9].



**Figure 12** – Fonctionnement d'un panneau PV au niveau électrique.



[9] G. C. Knabben, *Micro-onduleur photovoltaïque non isolé à deux étages*, mémoire de master, Département de Génie Électrique et Électronique, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brésil, 2017.

# DATASHEETS

## Notions de base du PV

- **STC** (*Standard Test Conditions*)
  - $S = 1000 \text{ W/m}^2$
  - $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
  - $AM = 1.5$
- **NOCT** (*Normal Operation Cell Temperature*)
  - $S = 800 \text{ W/m}^2$
  - $T_{amb} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
  - $AM = 1.5$
  - Vitesse du vent = 1 m/s

Figure 13 – Datasheet du panneau Kyocera KC85TS [10].

■ Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	87W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	17.4V
Maximum Power Current (Impp)	5.02A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.7V
Short Circuit Current (Isc)	5.34A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	$-8.21 \times 10^{-2} \text{ V/}^\circ\text{C}$
Temperature Coefficient of Isc	$2.12 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
*STC : Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C	
■ Electrical Performance at 800W/m <sup>2</sup> , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	62W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	15.3V
Maximum Power Current (Impp)	4.06A
Open Circuit Voltage (Voc)	19.7V
Short Circuit Current (Isc)	4.31A
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C	

[10] [https://reenergyhub.com/files/hersteller/Kyocera/pdf/Kyocera\\_KC85TS\\_EN.pdf](https://reenergyhub.com/files/hersteller/Kyocera/pdf/Kyocera_KC85TS_EN.pdf)

# À RETENIR

---

## Notions de base du PV

- Les panneaux PV fonctionnent à partir de l'**effet photovoltaïque**
- Les modules photovoltaïques sont **composés de plusieurs cellules**
- **La production PV dépend** principalement de :
  - L'**irradiance**
  - La **température**
  - La **masse d'air**
- Les **3 points** caractéristiques des panneaux PV sont :
  - $V_{oc}$
  - $I_{sc}$
  - $V_{MPP}$  et  $I_{MPP}$

# Questions ?

## Notions de base de l'électronique de puissance

**Qui en a déjà entendu parler ?**  
**Des exemples ?**



# DÉFINITION

---

## Notions de base de l'EP

L'électronique de puissance consiste à étudier les circuits électroniques destinés à contrôler le flux d'énergie électrique [11].

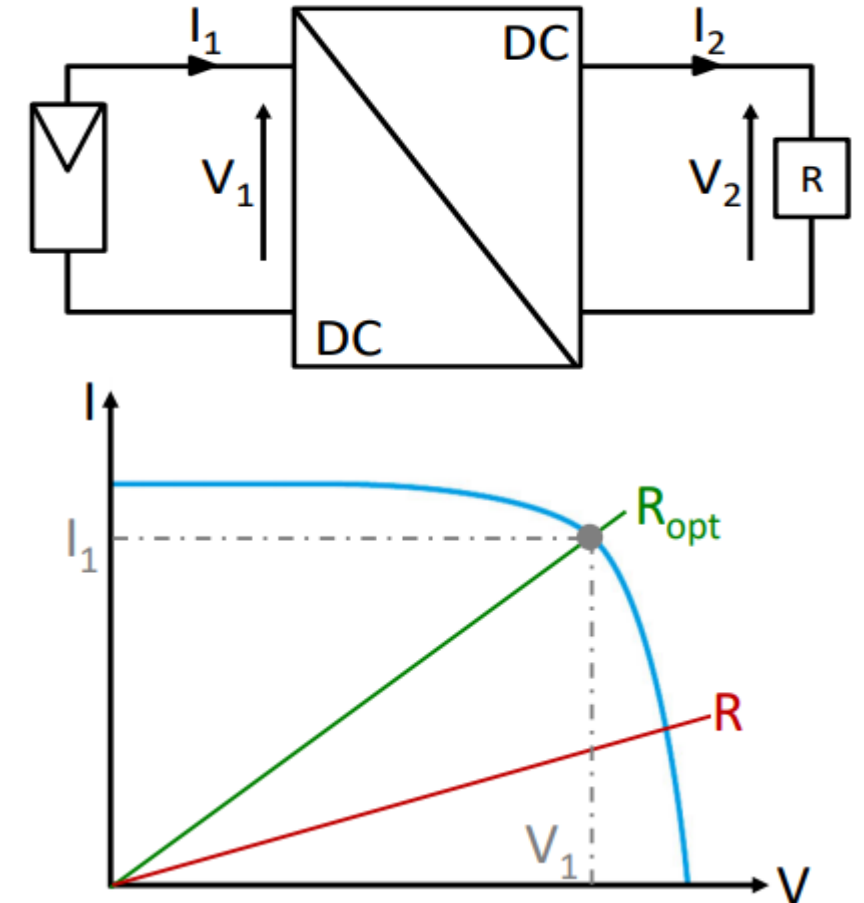
[11] <https://books.google.fr/books?id=HxdHDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=4oJUKmnFAT&dq=info%3AYMhXeMCq24IJ%3A%3Ascholar.google.com&lr&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

# APPLICATIONS

## Notions de base de l'EP

- Interface entre le réseau électrique et les machines
  - Variateurs de vitesse pour moteurs CC ou CA
- Production renouvelable
  - *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)
- Mobilité électrique
- Interfaces CA / CC pour le transport d'énergie en CC
- Chargeur de téléphone
- Plaque à induction

Figure 15 – Principe du MPPT [6].

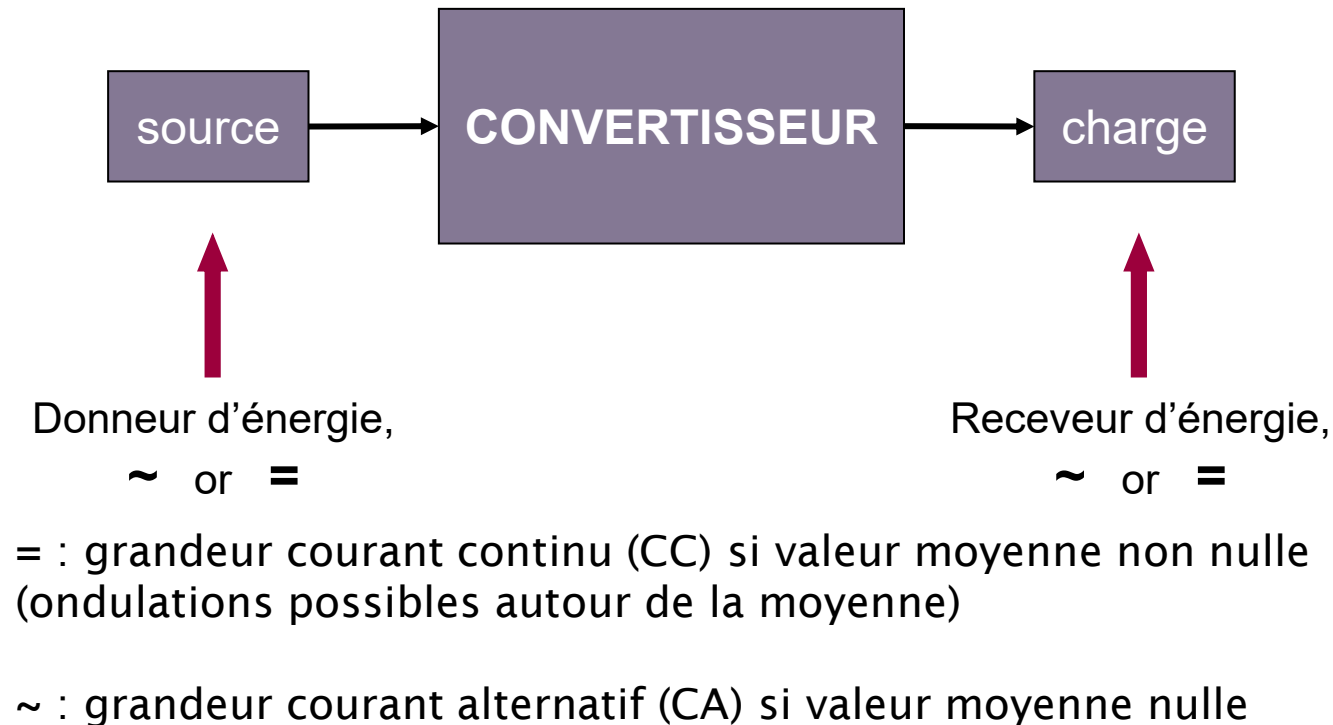


[6] S. Meunier, *Photovoltaic systems*, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, Gif-sur-Yvette, France, 2025.

# CONCEPTS FUNDAMENTAUX

## Notions de base de l'EP

Figure 16 – Schéma général d'un convertisseur [12].

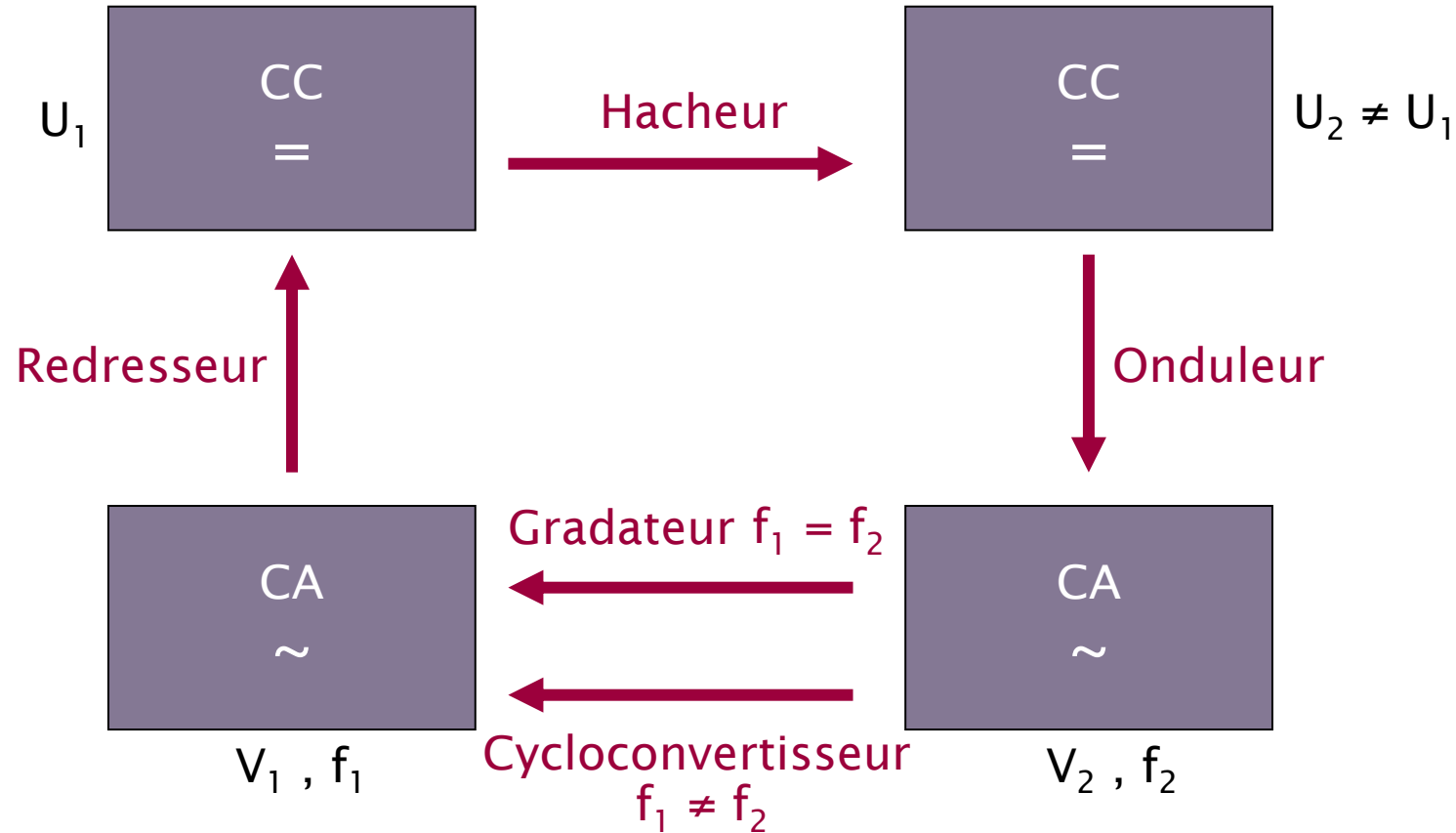


[12] M. Petit, *Conversion d'énergie : Introduction à la conversion électronique de puissance*, supports de cours, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Département SEE, France, 2025.

# CONCEPTS FUNDAMENTAUX

## Notions de base de l'EP

Figure 17 – Familles des convertisseurs [12].



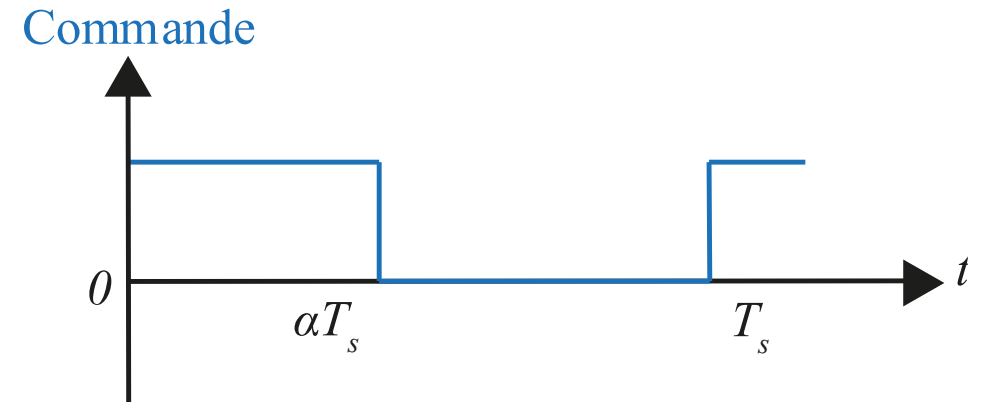
[12] M. Petit, *Conversion d'énergie : Introduction à la conversion électronique de puissance*, supports de cours, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Département SEE, France, 2025.

# CONCEPTS FONDAMENTAUX

## Notions de base de l'EP

- Fonctionnement par **commutations**
  - Utilisation d'**interrupteurs électroniques**
  - Basés sur des semi-conducteurs
  - Commandés ou non
  - Diodes, thyristors, MOSFETs, IGBTs, etc
- Fonctionnement **périodique**
  - **Fréquence de découpage** (commutation) :  $f_s$
  - Période de découpage (commutation) :  $T_s = \frac{1}{f_s}$
  - Pendant une période de découpage, les interrupteurs restent fermés (conduisent) pendant  $t_{on}$
- **Rapport cyclique** :  $\alpha = \frac{t_{on}}{T_s}$

Figure 18 – Signal de commande d'un interrupteur.

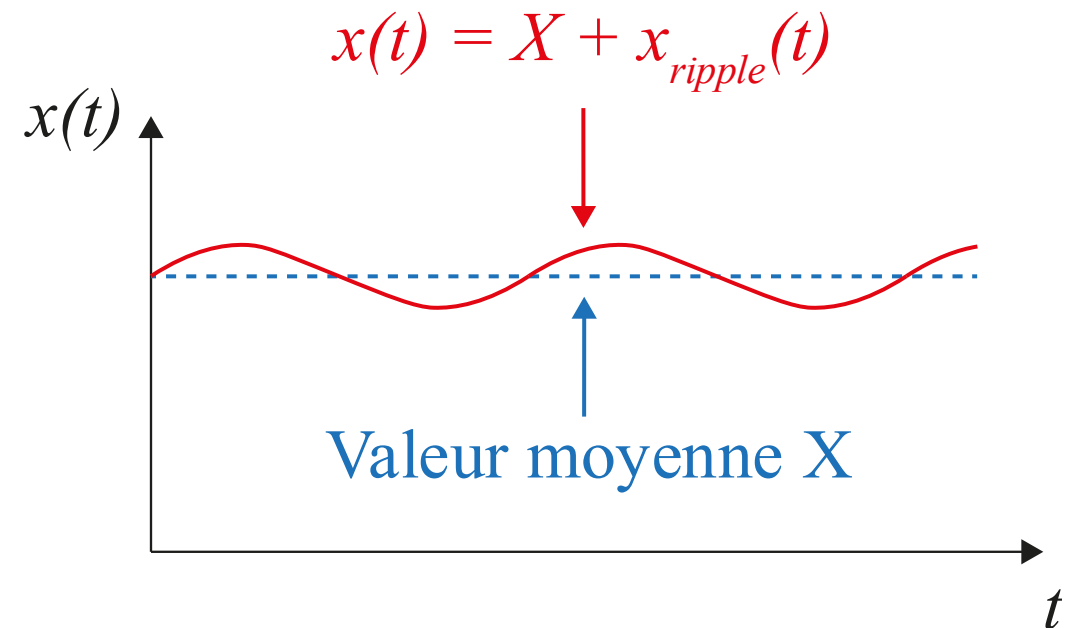


# CONCEPTS FONDAMENTAUX

## Notions de base de l'EP

- En **CC**, un signal électrique  $x(t)$  peut être décomposé en deux composantes :
  - La **valeur moyenne** :  $X$
  - L'ondulation (ou **ripple**) :  $x_{ripple}(t)$
- **ATTENTION**
  - Notation en majuscules = valeur moyenne
  - Notation en minuscules = valeur dépendante du temps

Figure 19 – Concept d'ondulation (*ripple*).



# HYPOTHÈSES – HACHEURS (CC/CC)

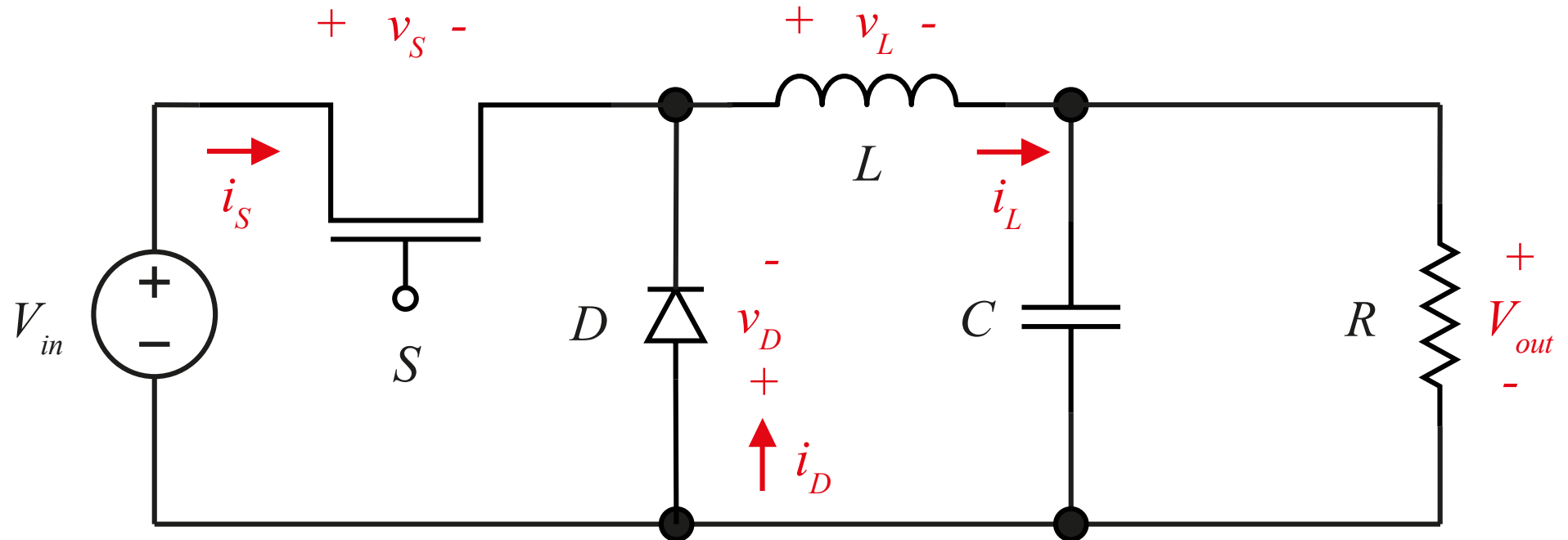
## Notions de base de l'EP

- **Composants idéaux** (aucune perte n'est considérée)
  - $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = 100\%$
- **Régime permanent**
  - La valeur moyenne du courant dans les condensateurs est nulle :  $I_c = 0$
  - La valeur moyenne de la tension aux bornes des inductances est nulle :  $V_L = 0$
- **Mode de Conduction Continue** (MCC)
  - Le courant dans l'inducteur n'est jamais nul
- **Ondulations faibles**
  - La tension de sortie est supposée constante. Autrement dit, le *ripple* de tension est négligé  $v_{out\text{ripple}}(t) = 0$

# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP

Figure 20 – Hacheur Buck.





# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP

$$v_L(t) = V_{in} - V_{out} \quad i_L(t) = \left( \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \right) t + I_m$$

$$v_S(t) = 0$$

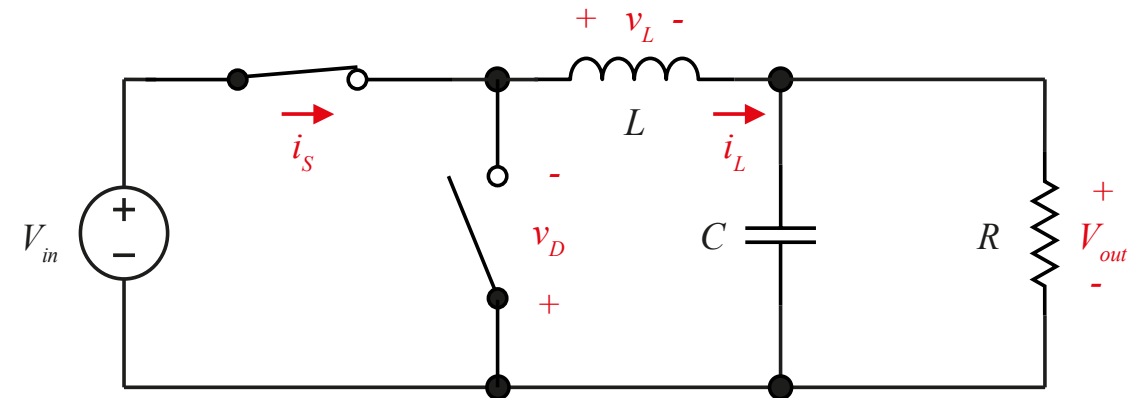
$$i_S(t) = i_L(t)$$

$$v_D(t) = -V_{in}$$

$$i_D(t) = 0$$

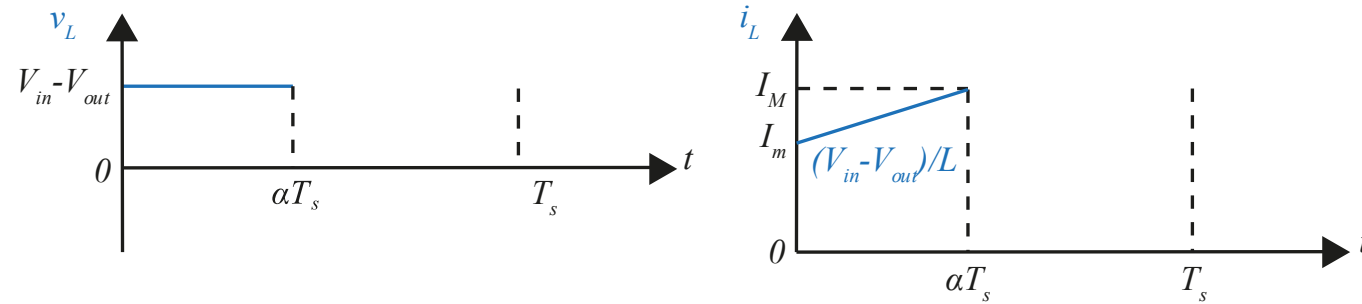
- **Premier demi-cycle -  $0 < t \leq \alpha \cdot T_s$**

Figure 21 - Premier demi-cycle.



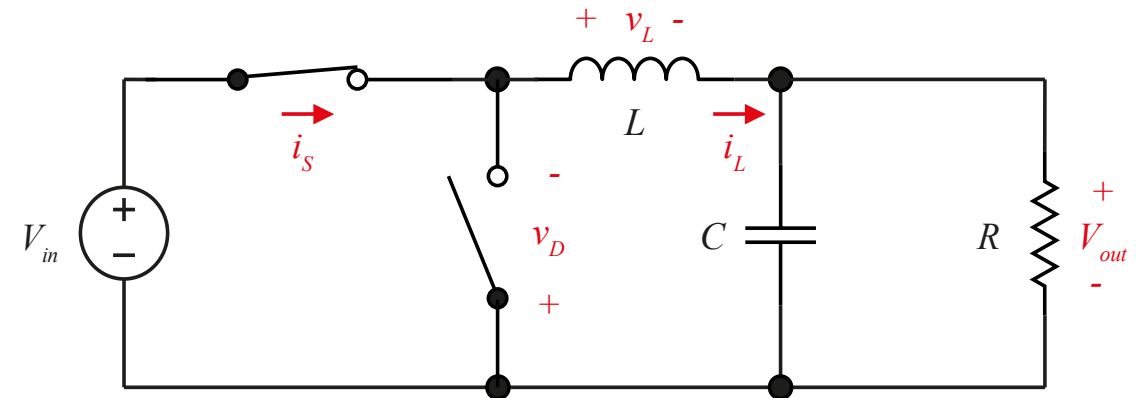
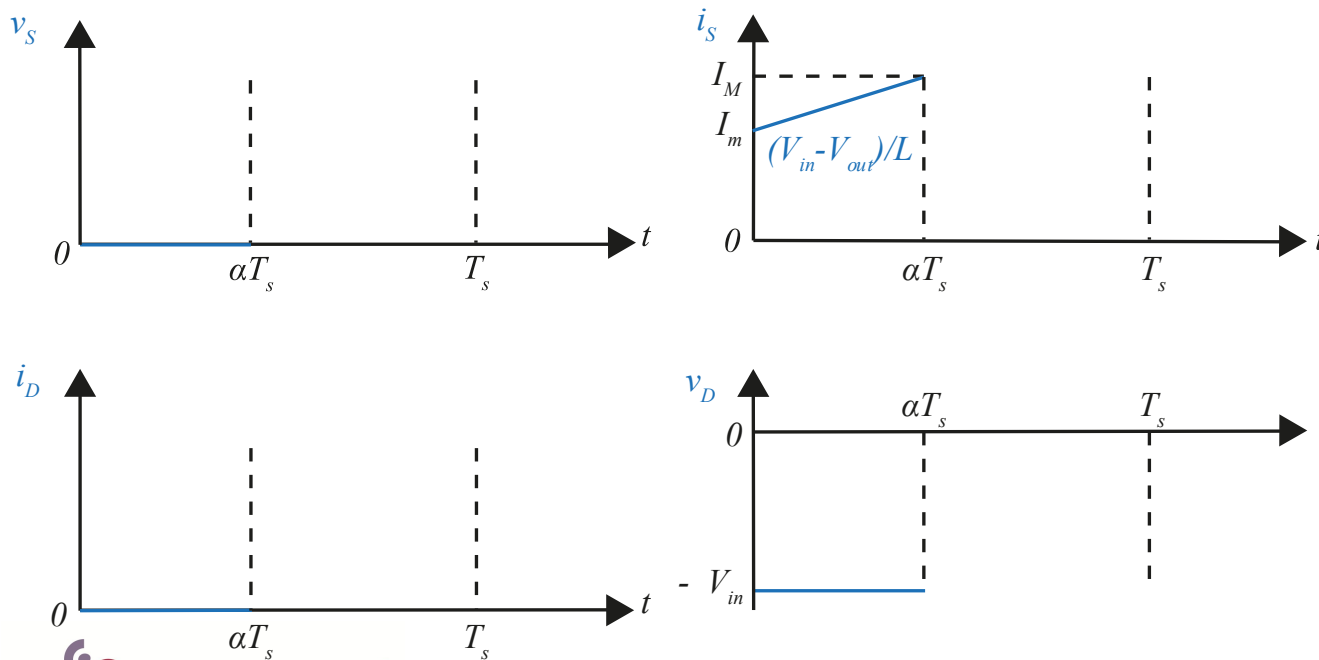
# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP



- **Premier demi-cycle -  $0 < t \leq \alpha \cdot T_s$**

Figure 21 - Premier demi-cycle.



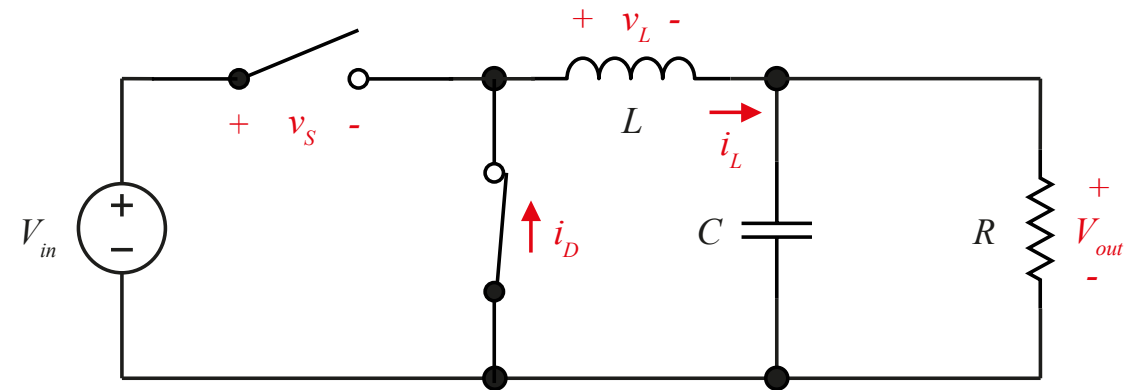
# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP



- Deuxième demi-cycle -  $\alpha T_s \leq t < T_s$

Figure 22 - Deuxième demi-cycle.



# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP

$$v_L(t) = -V_{out} \quad i_L(t) = \frac{-V_{out}}{L}(t - \alpha T_s) + I_M$$

$$v_S(t) = V_{in}$$

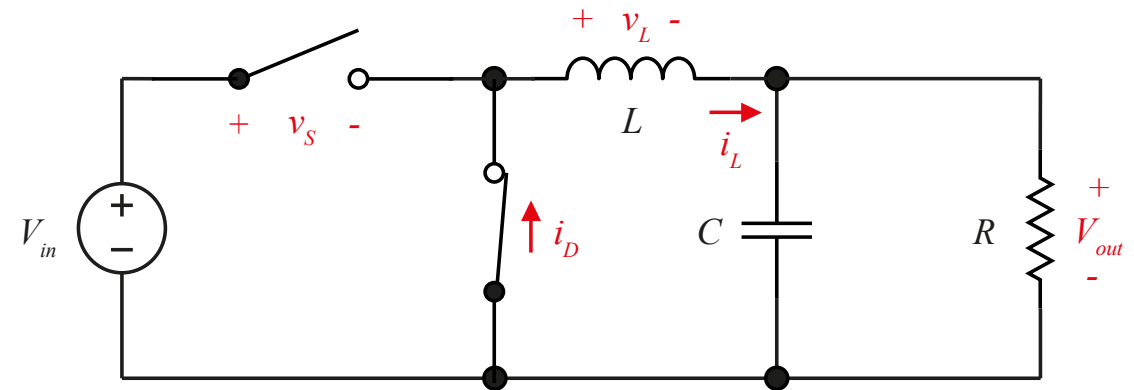
$$i_S(t) = 0$$

$$v_D(t) = 0$$

$$i_D(t) = i_L(t)$$

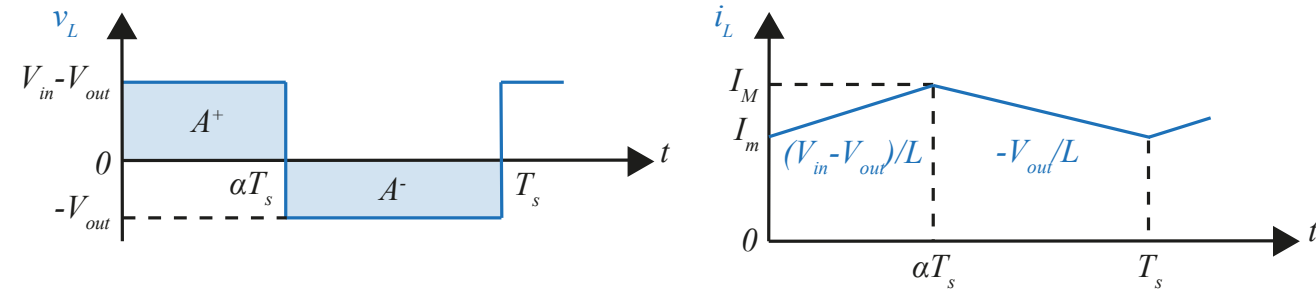
- **Deuxième demi-cycle** -  $\alpha T_s \leq t \leq T_s$

Figure 22 - Deuxième demi-cycle.



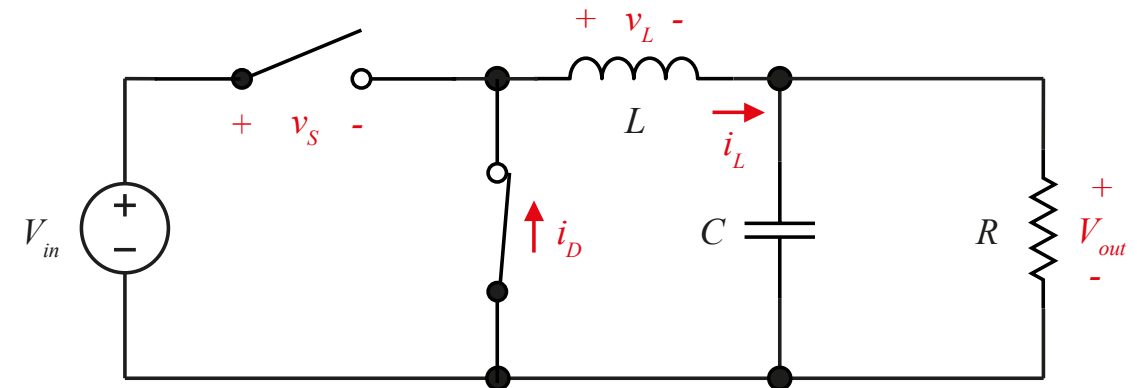
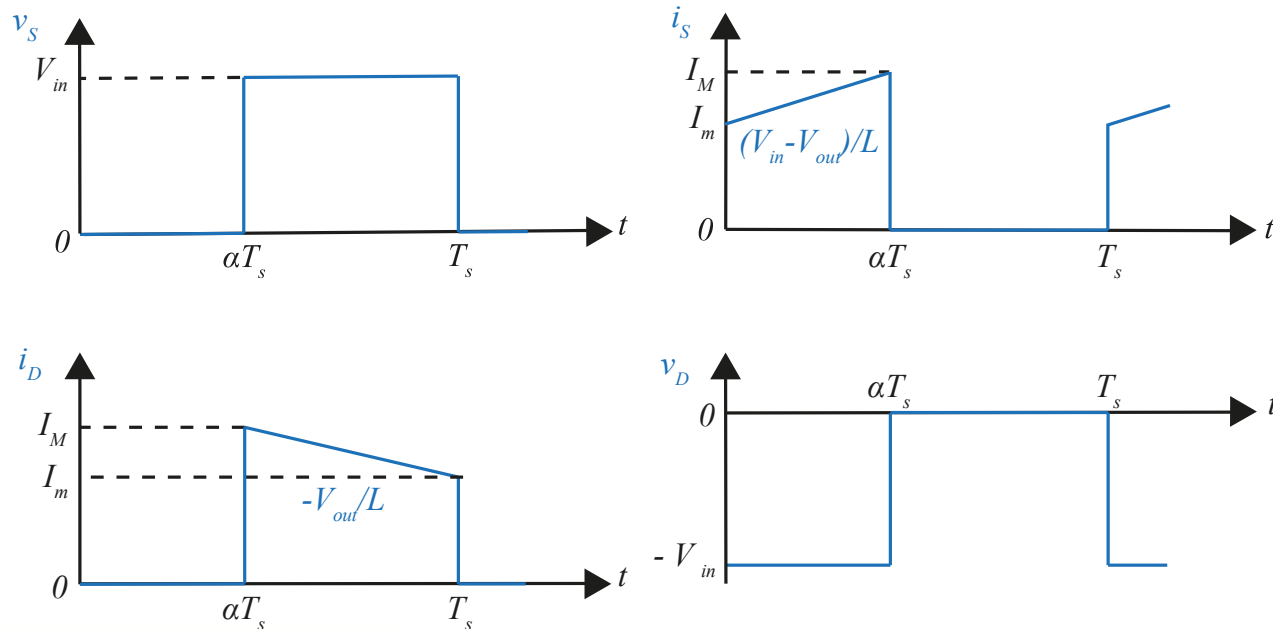
# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP



- **Deuxième demi-cycle -  $\alpha T_s \leq t \leq T_s$**

Figure 22 - Deuxième demi-cycle.

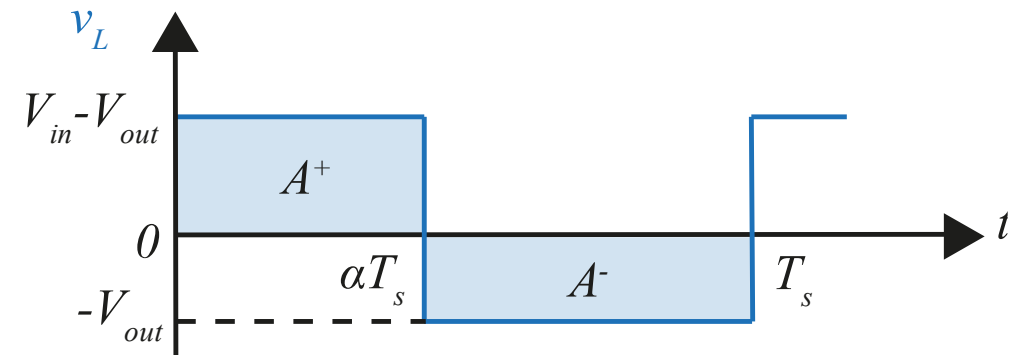


# HACHEUR BUCK

## Notions de base de l'EP

- Comme nous avons supposé un régime permanent, la valeur moyenne de la tension  $v_L(t)$  est nulle
  - $V_L = 0$
- Pour que cela soit vérifié, la **somme algébrique des aires  $A^+$  et  $A^-$  doit être nulle**
  - $A^+ + A^- = 0 \Rightarrow (V_{in} - V_{out}) \cdot \alpha T_s + (-V_{out}) \cdot T_s = 0$
- En développant la dernière expression, on obtient l'expression du **gain statique** d'un Buck
  - $G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \alpha$

Figure 23 - Tension aux bornes de l'inductance.



# À RETENIR

---

## Notions de base de l'EP

- Fonctionnement par **commutations** de fréquence  $f_s$
- Utilisation d'**interrupteurs électroniques**
  - Diodes, thyristors, MOSFETs, IGBTs, etc
- **Rapport cyclique** :  $\alpha = \frac{t_{on}}{T_s}$
- En CC, un signal électrique  $x(t) = X + x_{ripple}(t)$
- Pour un hacheur Buck
  - $G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \alpha$

# Questions ?



# PARTIE THÉORIQUE

---

## Émulateur PV *open-source*

# C'est quoi l'*open-source* ? Quel est l'intérêt ?

# OPEN-SOURCE

---

## Émulateur PV *open-source*

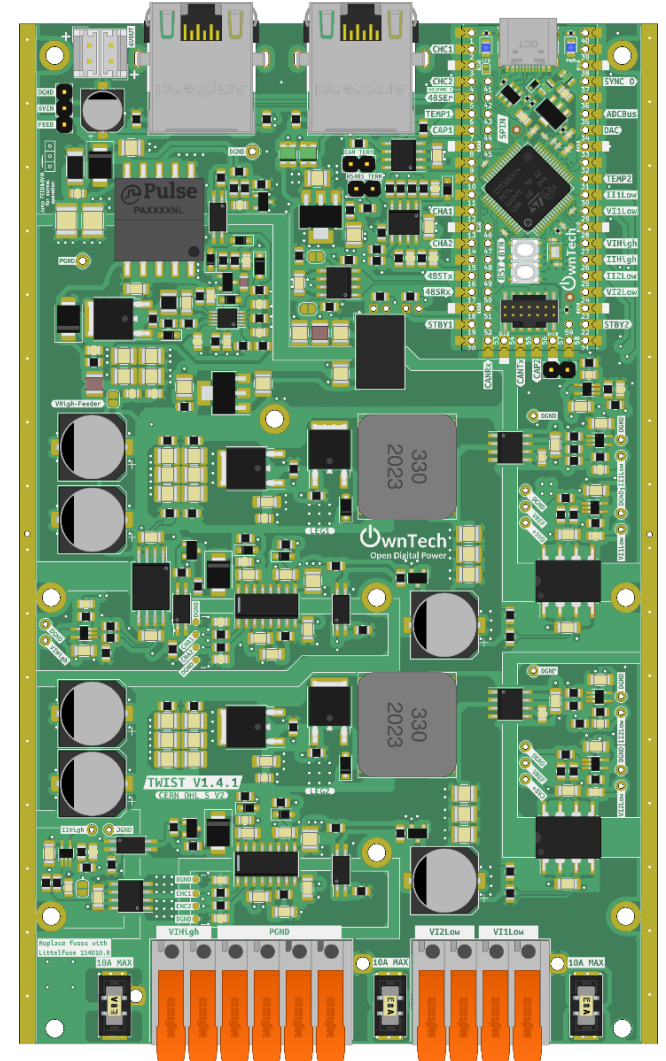
- Logiciels et algorithmes dont le code source est accessible publiquement, et que chacun peut utiliser, étudier, modifier et redistribuer
- Intérêts
  - Transparence
  - Gratuité
  - Diffusion du savoir
  - Innovation
  - Collaboration
  - Pérennité des projets

# OWNTECH

# Émulateur PV *open-source*

- OwnTech est une start-up française qui vise à **démocratiser** l'électronique de puissance grâce à l'*open-source* et à l'*open-hardware*
- **SPIN** (commande) et **TWIST** (puissance)
- **Capteurs de tension et de courant** sur la carte TWIST
- **Régulateur PID** (Proportionnel Intégral Dérivé) dans la partie SPIN

**Figure 24 – Carte OwnTech [13].**



# C'EST QUOI UN ÉMULATEUR PV ?

## Émulateur PV *open-source*

- Dispositif qui **reproduit le comportement électrique d'un panneau PV** sans utiliser un module réel
- Il permet de **générer une courbe I-V** identique à celle d'un panneau PV
- Il peut émuler différentes **conditions d'irradiance et de température**

Figure 25 – Keysight E4360 Series Modular Solar Array Simulator [14].



[14] <https://www.keysight.com/fr/en/products/dc-power-supplies/dc-power-solutions/e4360-series-modular-solar-array-simulators.html>

# INTÉRÊTS D'UN ÉMULATEUR PV

---

## Émulateur PV *open-source*

- **Indépendance** vis-à-vis des conditions météorologiques
- **Reproductibilité** des essais
- **Gain de temps et de coûts**
- **Flexibilité**

# STRUCTURE

## Émulateur PV *open-source*

Figure 26 – Schéma simplifié de l'émulateur PV *open-source*.

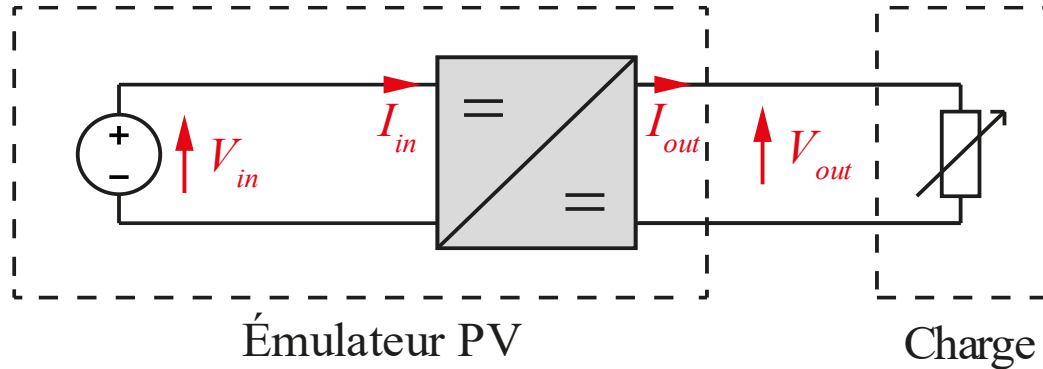
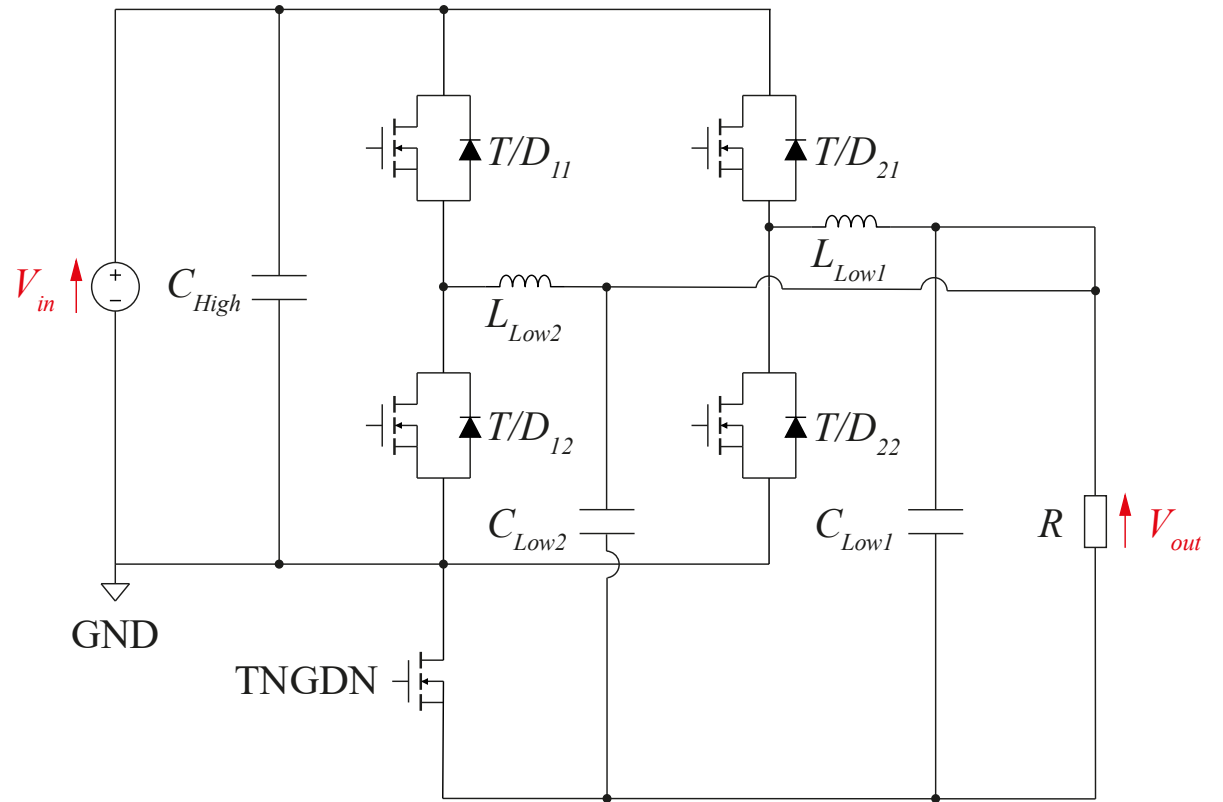


Figure 27 – Schéma détaillé de l'émulateur PV *open-source*.

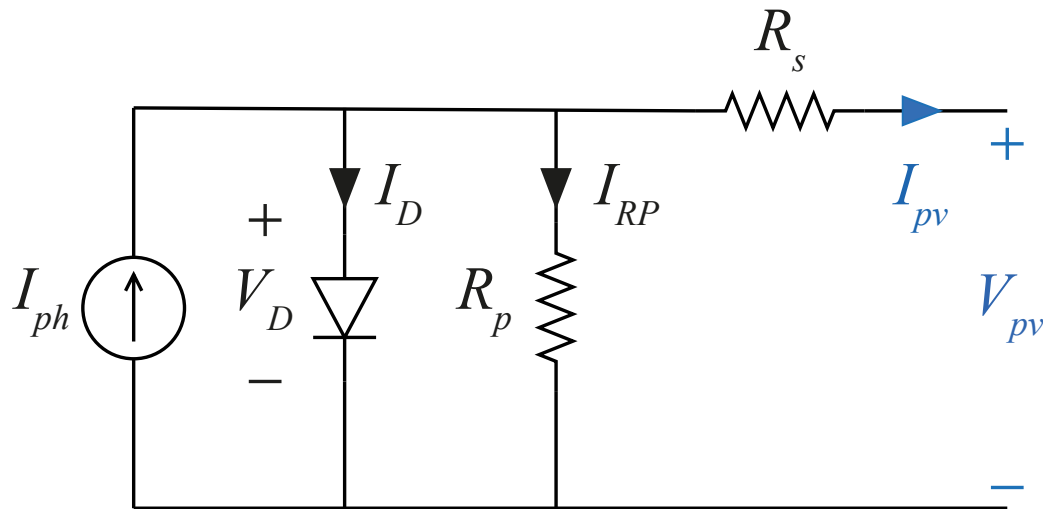


# MODÈLE À UNE DIODE

## Émulateur PV *open-source*

$$I_{pv} = I_{ph}^{ref} \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) [1 + \alpha(T - T^{ref})] - I_{s0}^{ref} \left( \frac{T}{T^{ref}} \right)^3 \left( e^{\frac{q(R_s I_{pv} + V_{pv})}{AkT}} - 1 \right) e^{\frac{n_s q}{Ak} \left( E_{G0} - \frac{k_1 T^2}{T + k_2} \right) \left( \frac{1}{T^{ref}} - \frac{1}{T} \right)} - \frac{R_s I_{pv} - V_{pv}}{R_p}$$

Figure 28 - Schéma électrique du modèle à une diode.



$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ph}^{ref} - I_{s0}^{ref} \left( e^{\frac{q R_s I_{sc}^{ref}}{AkT^{ref}}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}^{ref}}{R_p} = I_{sc}^{ref} \\ I_{ph}^{ref} - I_{s0}^{ref} \left( e^{\frac{q V_{oc}^{ref}}{AkT^{ref}}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}^{ref}}{R_p} = 0 \\ I_{ph}^{ref} - I_{s0}^{ref} \left( e^{\frac{q(R_s I_{mp}^{ref} + V_{mp}^{ref})}{AkT^{ref}}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{mp}^{ref} + V_{mp}^{ref}}{R_p} = I_{mp}^{ref} \\ R_s + \frac{q I_{s0}^{ref} R_p (R_s - R_p)}{AkT^{ref}} e^{\frac{q I_{sc}^{ref}}{AkT^{ref}}} = 0 \\ I_{ph}^{ref} - \frac{2V_{mp}^{ref}}{R_p} - I_{s0}^{ref} \left( \left[ 1 + \frac{q(V_{mp}^{ref} - R_s I_{mp}^{ref})}{AkT^{ref}} \right] e^{\frac{q(R_s I_{mp}^{ref} + V_{mp}^{ref})}{AkT^{ref}}} - 1 \right) = 0 \end{array} \right.$$



# MODÈLE À UNE DIODE

## Émulateur PV *open-source*

$I_{pv}$  — courant de sortie [A]

$I_{ph}^{ref}$  — courant photoélectrique de référence [A]

$S$  — irradiance en fonctionnement [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$S^{ref}$  — irradiance de référence [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\alpha$  — coefficient de température de  $I_{sc}$  [%/°C ou %/K]

$T$  — température de fonctionnement [K]

$T^{ref}$  — température de référence [K]

$I_{s0}^{ref}$  — courant de saturation de référence [A]

$R_s$  — résistance série [ $\Omega$ ]

$V_{pv}$  — tension de sortie [V]

$A$  — facteur d'idéalité de la diode [—]

$k$  — constante de Boltzmann [J/K]

$q$  — charge élémentaire [C]

$n_s$  — nombre de cellules en série [—]

$E_{G0}$  — énergie de bande interdite à 0 K [eV]

$k_1$  — coefficient dépendant du matériau [eV/K]

$k_2$  — constante empirique [K]

$R_p$  — résistance parallèle [ $\Omega$ ]

$V_{mp}^{ref}$  —  $V_{mp}$  de référence [V]

$I_{mp}^{ref}$  —  $I_{mp}$  de référence [A]

$V_{oc}^{ref}$  —  $V_{oc}$  de référence [V]

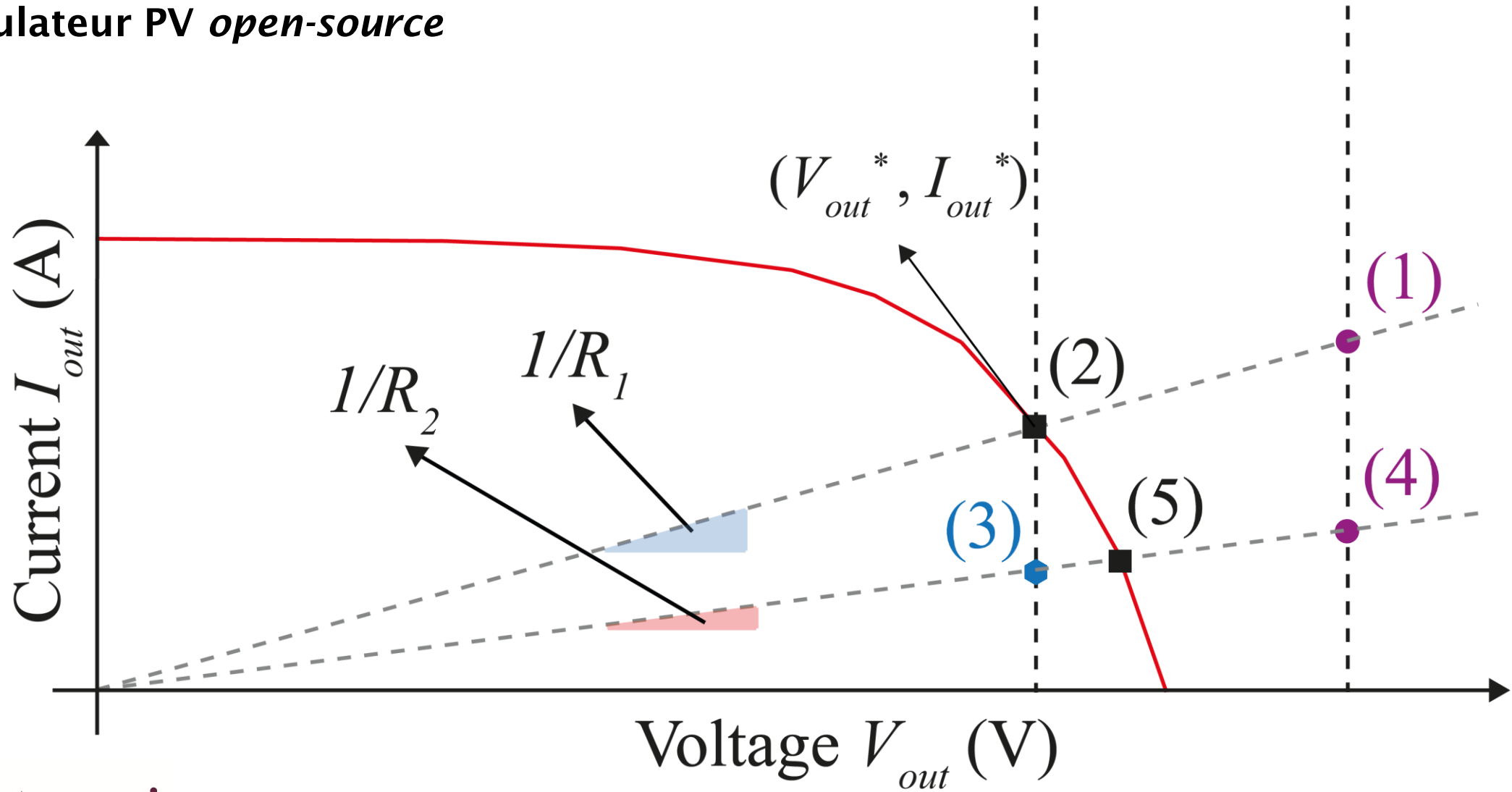
$I_{sc}^{ref}$  —  $I_{sc}$  de référence [A]

$\beta$  — coefficient de température de  $V_{oc}$  [%/°C ou %/K]

# ÉMULATION

Émulateur PV *open-source*

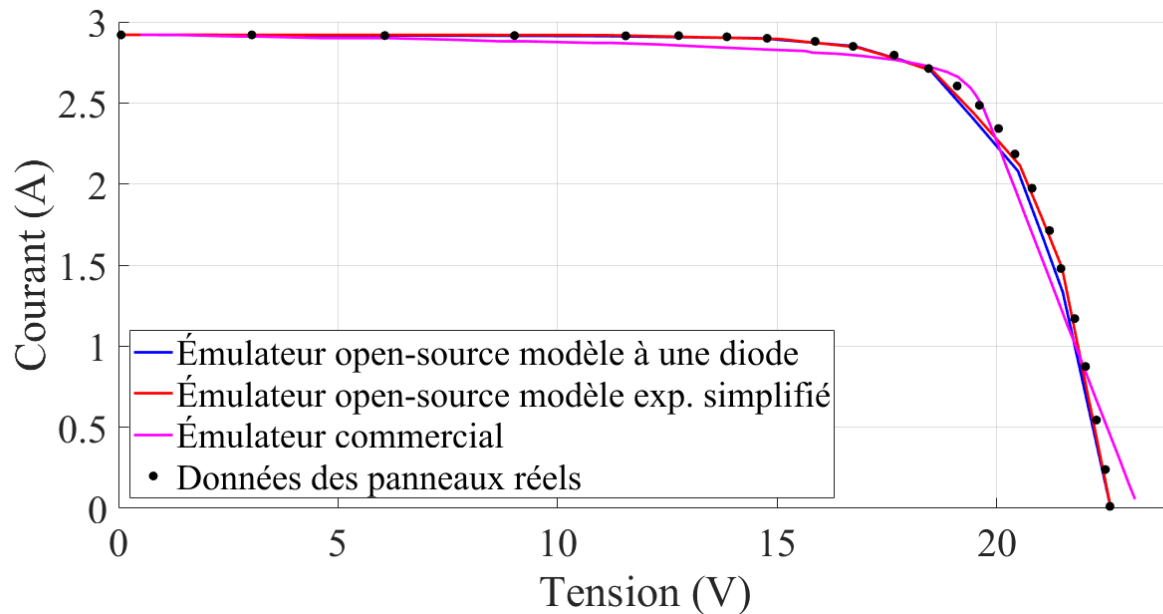
$$V_{out} = V_{out}^* \quad V_{out} = V_{out,0}$$



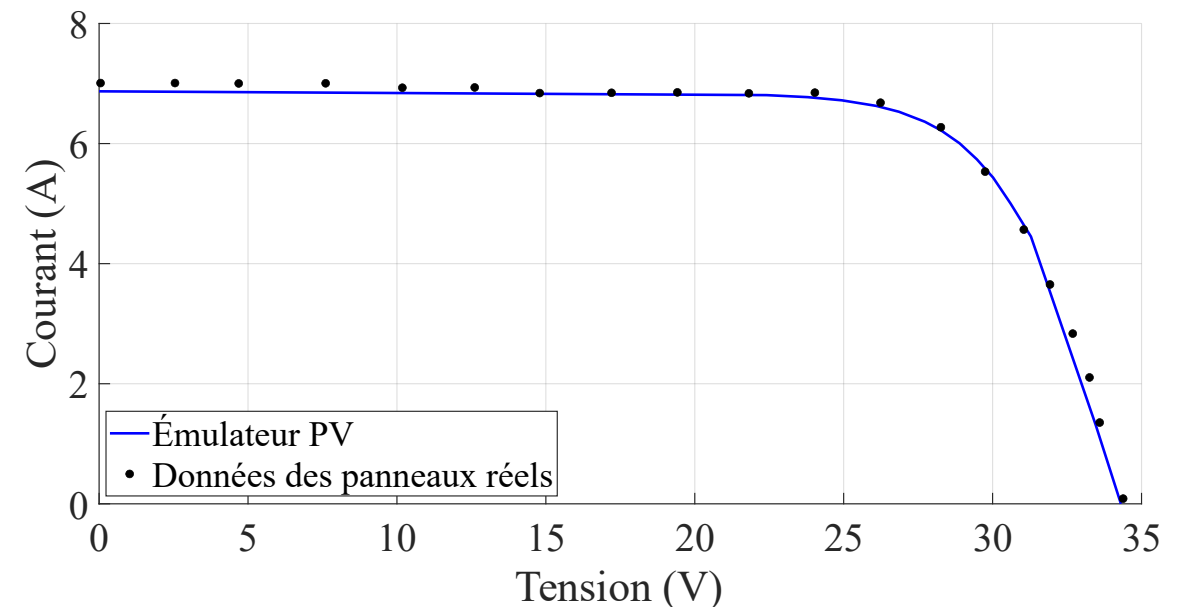
# RÉSULTATS PRATIQUES

## Émulateur PV *open-source*

**Figure 29** - Comparaison des émulateurs - Renogy RNG-50DB-H - 50 W (STC).



**Figure 30** - Données du panneau réel vs émulateur PV - CanadianSolar CS6P-250P ( $S = 765 \text{ W/m}^2$  et  $T = 44,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



# ALGORITHME

## Émulateur PV *open-source*

- Algorithme **C++ embarqué**
- Trois modes de fonctionnement :
  - **Mode Puissance (touche 'P')** : fait fonctionner la carte comme un hacheur Buck synchrone classique
  - **Mode Idle (touche 'I')** : désactive la conversion; aucune puissance n'étant alors délivrée à la charge
  - **Mode Émulateur (touche 'E')** : permet au système de fonctionner comme un émulateur PV

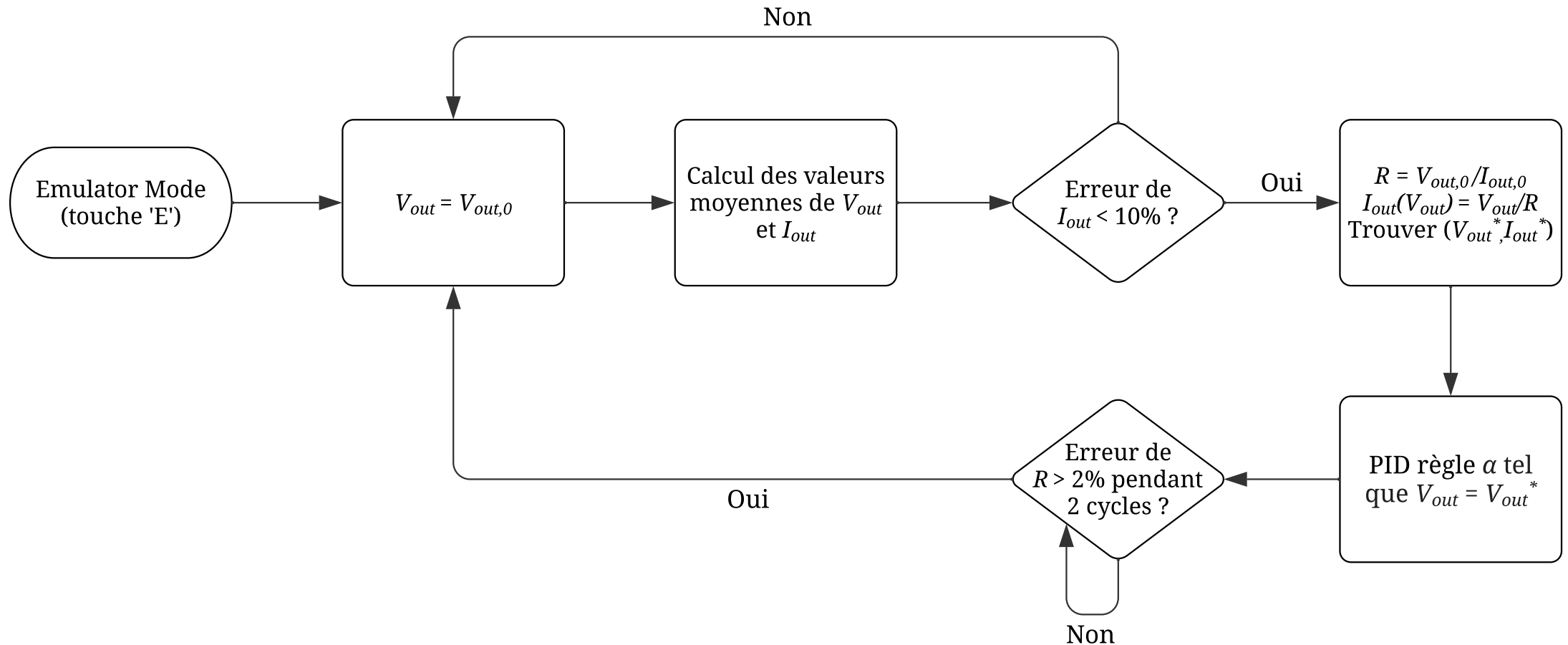
Figure 31 – Extrait de l'algorithme en C++.

```
case 'i': // IDLE mode
    printk("Idle mode\n");
    mode = MODE_IDLE;
    break;
case 'p': // POWER mode
    printk("Power mode\n");
    mode = MODE_POWER;
    dutyCycle = dutyCycleP;
    break;
case 'e': // EMULATOR mode
    printk("Emulator mode\n");
    dutyCycleP = dutyCycle; // Save current duty
    mode = MODE_EMULATOR;
    // Reset the emulator state machine
    dutyCycle = pid.calculateWithReturn(voltageReferenceE_test_point, lowVoltage1);
    shield.power.setDutyCycle(ALL, dutyCycle);
    currentHistory[0] = currentHistory[1] = 0.0f;
    emulatorSteadyState = false;
    waitingSteadyState = false;
    loadChangeCounter = 0;
    break;
```

# ALGORITHME

## Émulateur PV *open-source*

Figure 32 – Algorithme du Mode Émulateur.



# À RETENIR

---

## Émulateur PV *open-source*

- Un émulateur PV est un dispositif **reproduisant le comportement électrique** d'un panneau solaire
  - Il peut émuler différentes **conditions d'irradiance et de température**
- L'émulateur PV *open-source* est basé sur une **source d'alimentation CC**, une **carte OwnTech** et une **charge résistive adaptable**
- Stratégie d'émulation basée sur des **points de test**, des **droites de charge** et des **points d'intersection**
- Algorithme **C++ embarqué**

# Questions ?

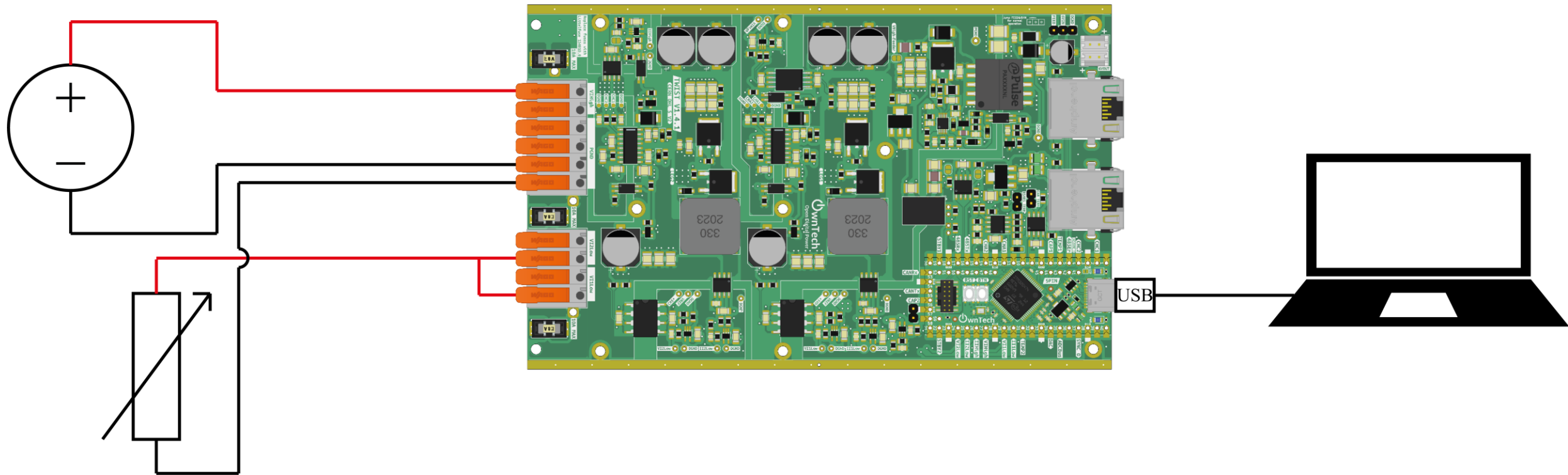
# Préparation pour le TP



# BRANCHEMENT DU SYSTÈME

## Préparation pour le TP

Figure 32 – Schéma du branchement du système pour l'émulateur PV.



# INSTALLATION DU *FIRMWARE*

---

## Préparation pour le TP

1. La première étape consiste à télécharger et installer l'environnement numérique nécessaire à l'utilisation de la carte OwnTech. Pour cela, suivez le [tutoriel OwnTech](#).
2. Après avoir terminé l'étape précédente, copiez le fichier *main.cpp* depuis le [GitHub de l'émulateur](#). Vous pouvez le faire en cliquant sur l'option « **Copy raw file** » sur GitHub.
3. Une fois cette étape réalisée, **collez l'algorithme** copié dans le fichier *main.cpp* généré dans l'environnement PlatformIO après avoir suivi le tutoriel « Environment Setup » d'OwnTech.

# SÉCURITÉ

---

## Préparation pour le TP

- Limiter la tension et le courant d'entrée que la source CC peut délivrer, en configurant correctement la source elle-même
- La valeur de  $V_{in}$  doit rester supérieure à la tension à vide  $V_{OC}$  du module PV émulé
- La carte OwnTech présente une limitation du courant de sortie maximal de 16 A, en raison des deux convertisseurs Buck connectés en parallèle. Le courant de court-circuit  $I_{SC}$  du module PV émulé doit rester inférieur à cette valeur.

# CONSIGNES

---

## Préparation pour le TP

- Trouver un panneau PV à émuler en respectant les contraintes suivantes :
  - $I_{sc} \leq 16 \text{ A}$
  - $12 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 100 \text{ V}$
- Limiter la source CC toute en respectant les contraintes suivantes :
  - $12 \text{ V} \leq V_{in} \leq 72 \text{ V}$
  - $V_{in} > V_{oc}$
- Tracer, à l'aide d'Excel, la courbe I-V du module PV choisi pour trois conditions différentes :
  - STC
  - $S = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
  - $S = 200 \text{ W/m}^2$  et  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

# PAUSE

---

15 MIN 

# PARTIE PRATIQUE

---

**1 H40**

# CONSIGNES

---

## Partie pratique

- Trouver un panneau PV à émuler en respectant les contraintes suivantes :
  - $I_{sc} \leq 16 \text{ A}$
  - $12 \text{ V} \leq V_{oc} \leq 100 \text{ V}$
- Limiter la source CC toute en respectant les contraintes suivantes :
  - $12 \text{ V} \leq V_{in} \leq 72 \text{ V}$
  - $V_{in} > V_{oc}$
- Tracer, à l'aide d'Excel, la courbe I-V du module PV choisi pour trois conditions différentes :
  - STC
  - $S = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
  - $S = 200 \text{ W/m}^2$  et  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

# ÉVALUATION

---

**15 MIN**



# ÉVALUATION

---

## Google Forms



# REFERENCES

---

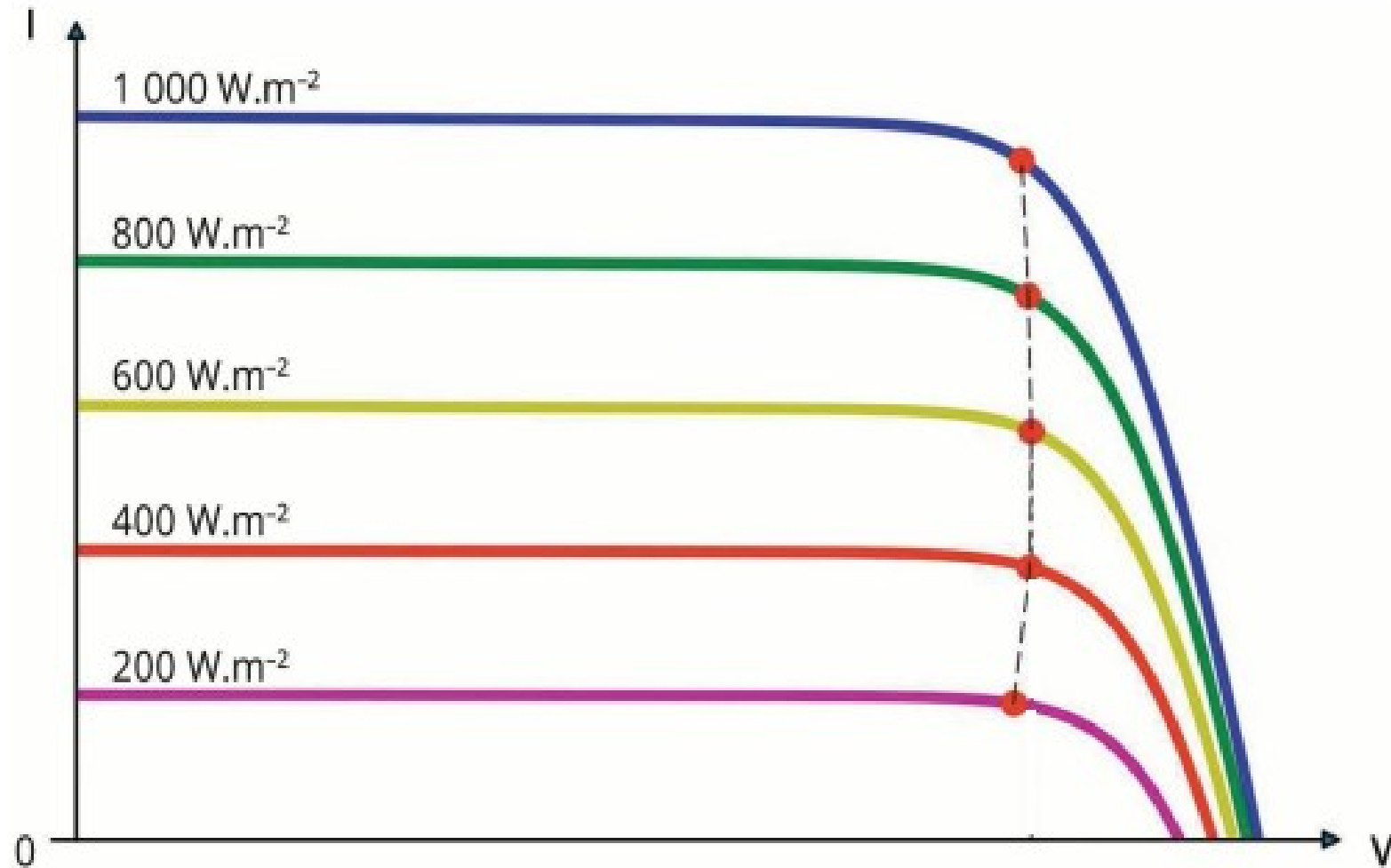
- [1] [https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/pdf/supply/GSR\\_2025\\_Factsheet\\_Supply\\_SolarPV.pdf](https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/pdf/supply/GSR_2025_Factsheet_Supply_SolarPV.pdf)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond\\_Becquerel](https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel)
- [3] <https://couleur-science.eu/?d=10d2d2--cest-quoi-un-semi-conducteur>
- [4] <https://mon-panneau-solaire.info/panneaux-solaires/cellules-photovoltaiques/>
- [5] <https://conseils-thermiques.org/contenu/fonctionnement-panneau-solaire.php>
- [6] S. Meunier, *Photovoltaic systems*, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, Gif-sur-Yvette, France, 2025.
- [7] <https://courses.ems.psu.edu/eme810/node/469>
- [8] [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe\\_et\\_technologie\\_photovolt%C3%AFque](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Principe_et_technologie_photovolt%C3%AFque)
- [9] G. C. Knabben, *Micro-onduleur photovoltaïque non isolé à deux étages*, mémoire de master, Département de Génie Électrique et Électronique, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brésil, 2017.
- [10] [https://reenergyhub.com/files/hersteller/Kyocera/pdf/Kyocera\\_KC85TS\\_EN.pdf](https://reenergyhub.com/files/hersteller/Kyocera/pdf/Kyocera_KC85TS_EN.pdf)
- [11] <https://books.google.fr/books?id=HxdHDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=4oJUKmnFAT&dq=info%3AYMhXeMCq24IJ%3A&scholar.google.com&lr&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- [12] M. Petit, *Conversion d'énergie : Introduction à la conversion électronique de puissance*, supports de cours, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Département SEE, France, 2025.
- [13] <https://github.com/owntech-foundation>
- [14] <https://www.keysight.com/fr/en/products/dc-power-supplies/dc-power-solutions/e4360-series-modular-solar-array-simulators.html>
- [15] <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/1044/933>

# Questions ?

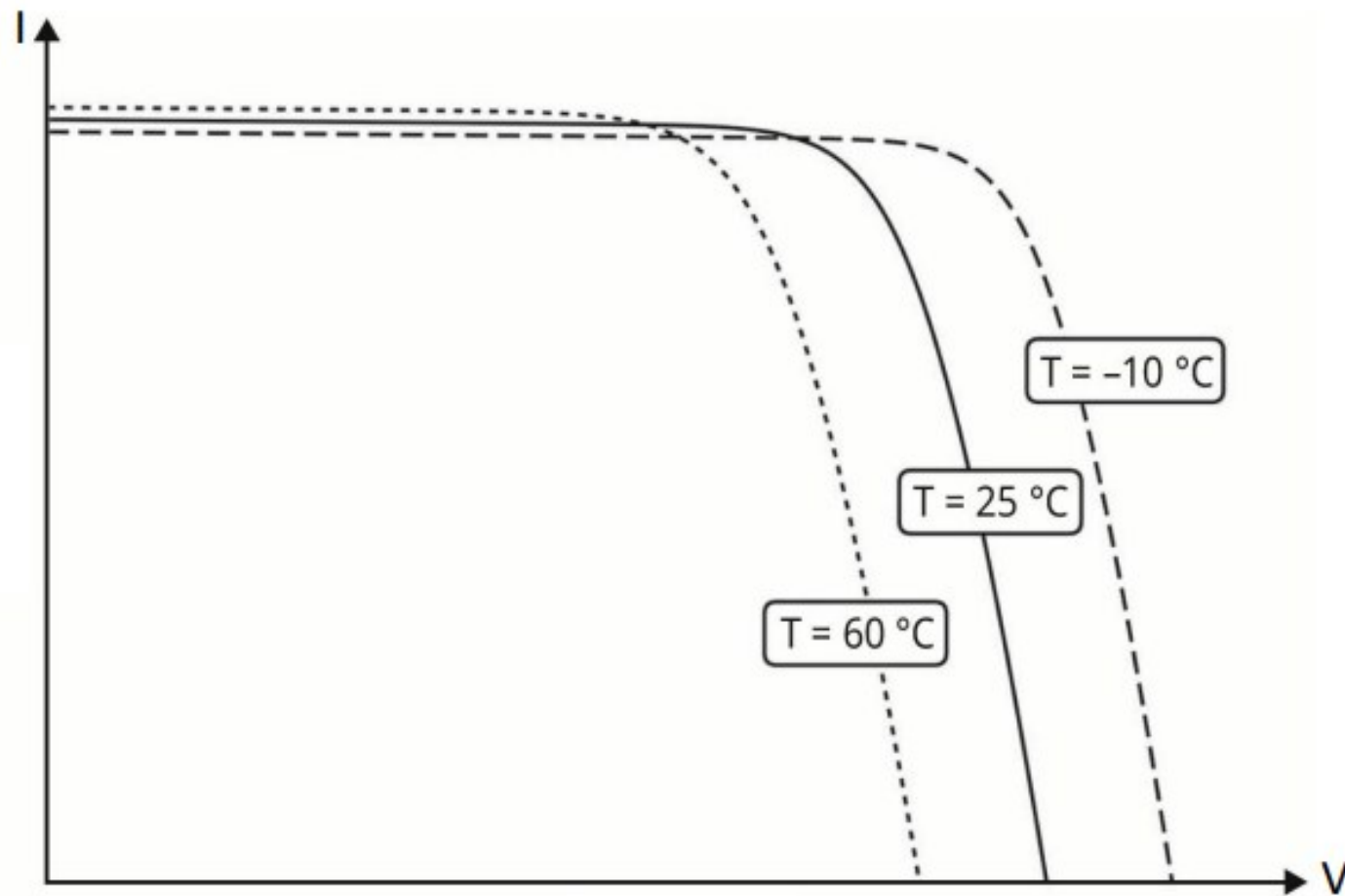
[gabriel.ceolindebrito@student-cs.fr](mailto:gabriel.ceolindebrito@student-cs.fr)

# ANNEXES

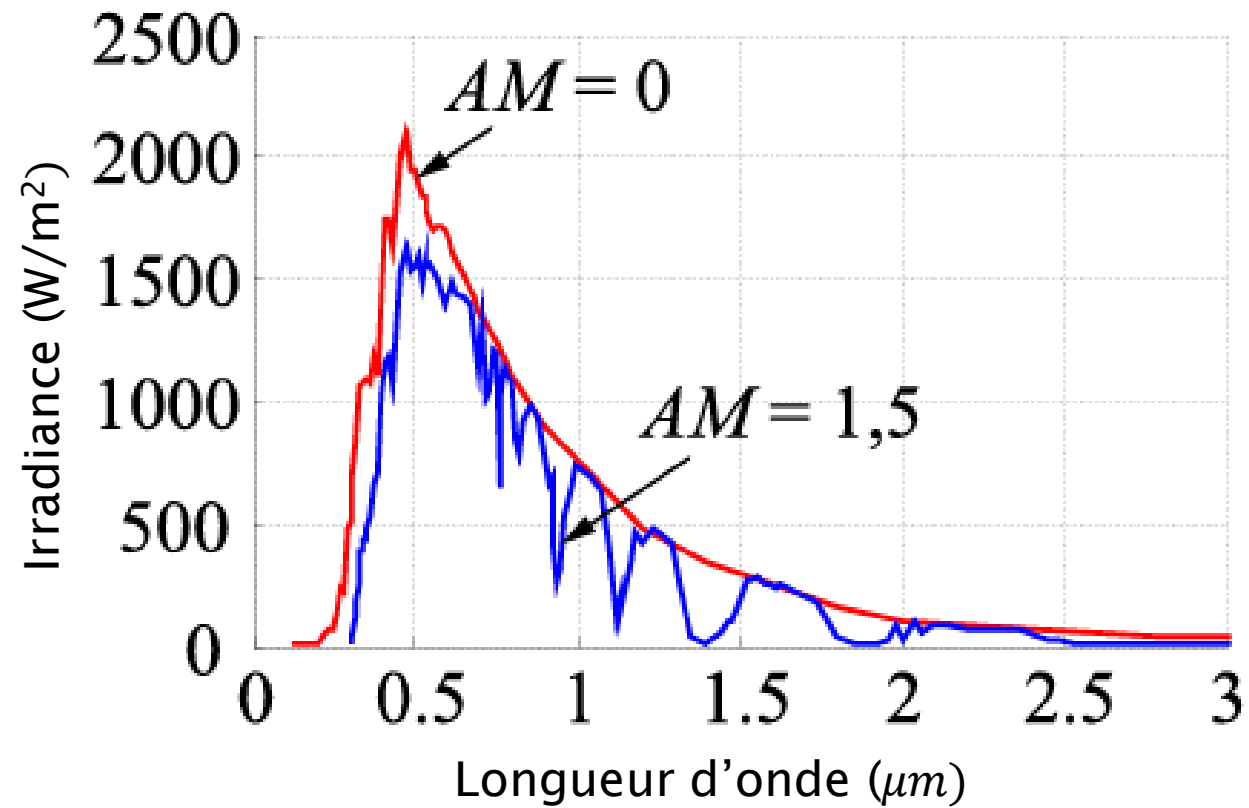
# ANNEXE A



# ANNEXE A



# ANNEXE B



[9] G. C. Knabben, *Micro-onduleur photovoltaïque non isolé à deux étages*, mémoire de master, Département de Génie Électrique et Électronique, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brésil, 2017.

# ANNEXE C

---

Estimation initiale de la valeur de la tension  $V_{oc}$  :

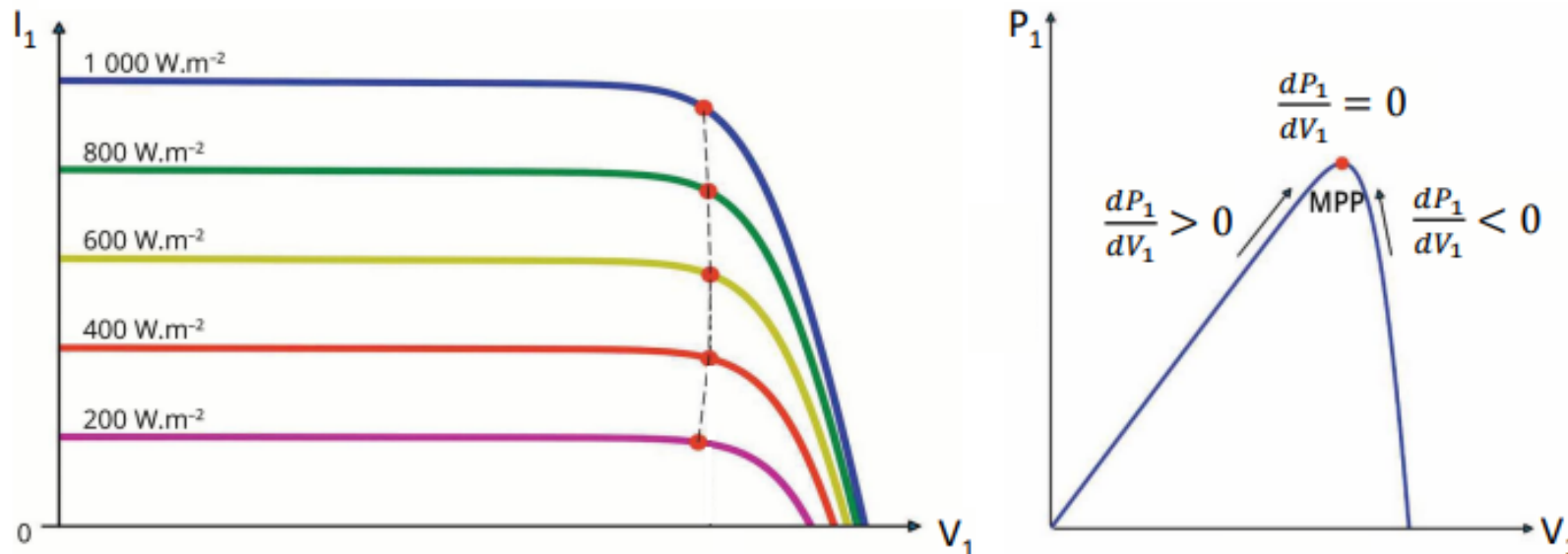
$$V_{oc} = V_{oc}^{ref} [1 + \beta(T - T^{ref})]$$



# ANNEXE D

## Operating point and maximum power point tracking

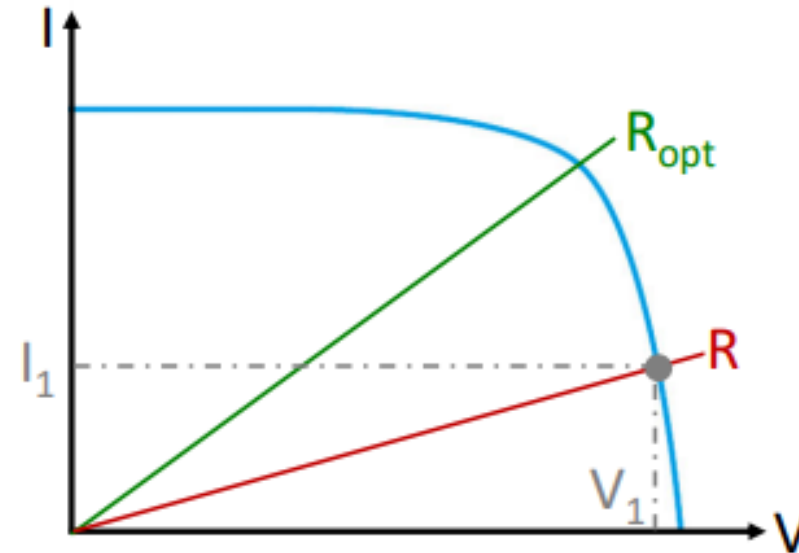
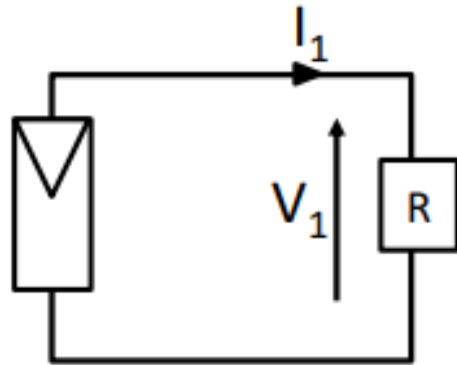
- The PV module I-V curve also varies with irradiance and temperature.
- Thanks to the converter, the output power from the PV module can be maximised at each time step. It is the Maximum Power Point Tracking (MPPT)
- Common method: Perturb & Observe (or 'Hill Climbing').  $V_1$  and  $P_1$  are measured, example for buck.
  - Start from a given  $V_1$  and  $P_1$ .
  - $k$  is increased.  $V_1$  is thus decreased and  $P_1$  is modified.
  - If  $\frac{dP_1}{dV_1} < 0$  then  $k$  must still be increased; if  $\frac{dP_1}{dV_1} > 0$  then  $k$  must be decreased.
  - A similar reasoning can be written by decreasing  $k$  at the start.



# ANNEXE D

## Operating point and maximum power point tracking

- The **operating point** of the photovoltaic module is determined by the **intersection** of its current-voltage characteristic and that of the connected load.
- In the situation below, the PV module does not produce its maximum possible power. Indeed,  $R$  imposes a ratio  $I_1/V_1$  that is not optimal for the module.



# ANNEXE D

## Operating point and maximum power point tracking

- The DC/DC converter allows to have a ratio  $I_1/V_1$  different from  $I_2/V_2$ . This is called **impedance matching**.
- Thus, the module can be **operated at its optimal power point** whatever the load.
- For this, the factor  $k$  of the converter (such that  $V_2 = k \cdot V_1$ ) must be set at  $k = \sqrt{\eta \cdot R / R_{opt}}$  ( $\eta$  : converter efficiency)
- If  $k$  (which depends on  $R$  and  $R_{opt}$ ) must be higher than 1, then boost converter; otherwise buck converter. Buck-boost is also an option for higher flexibility.

