

Émulateur photovoltaïque *open-source*

Gabriel Ceolin de Brito
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

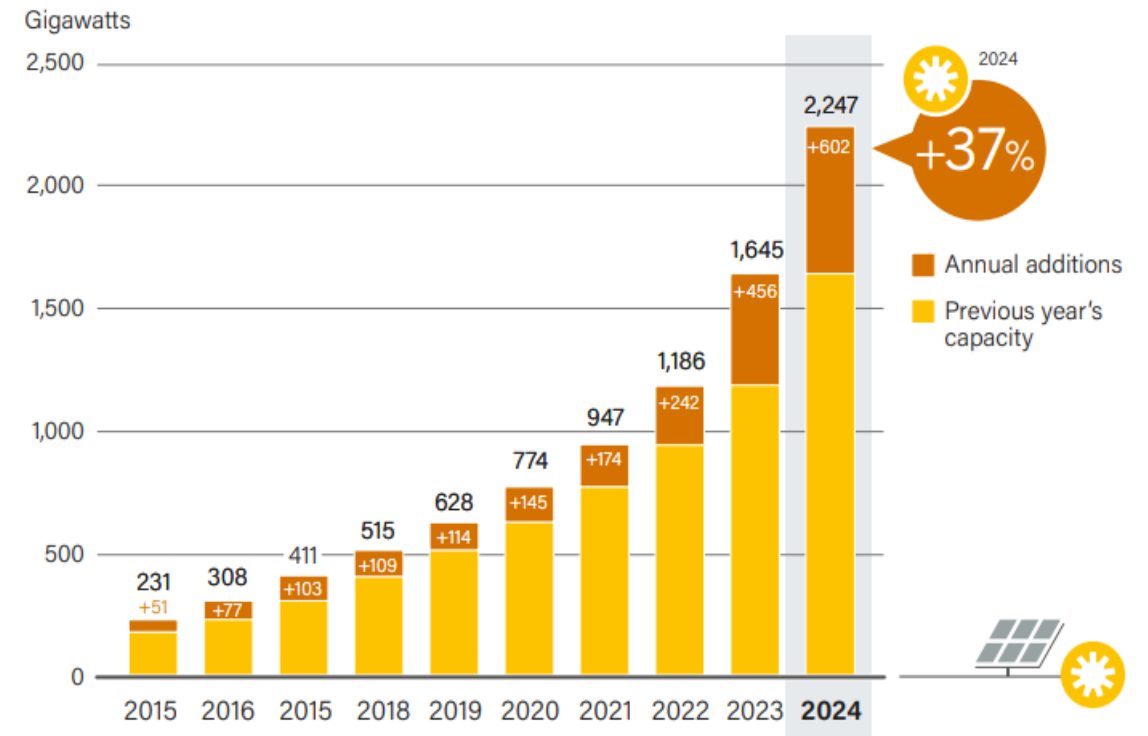
**Présenter un émulateur
photovoltaïque *open-source* basé
sur OwnTech**

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, contrôle et programmation embarquée

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



[1] 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

- **Edmon 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 – Edmon Becquerel [2].



[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel

EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Notions de base du PV

Figure 3 – Substrats N et P [3].

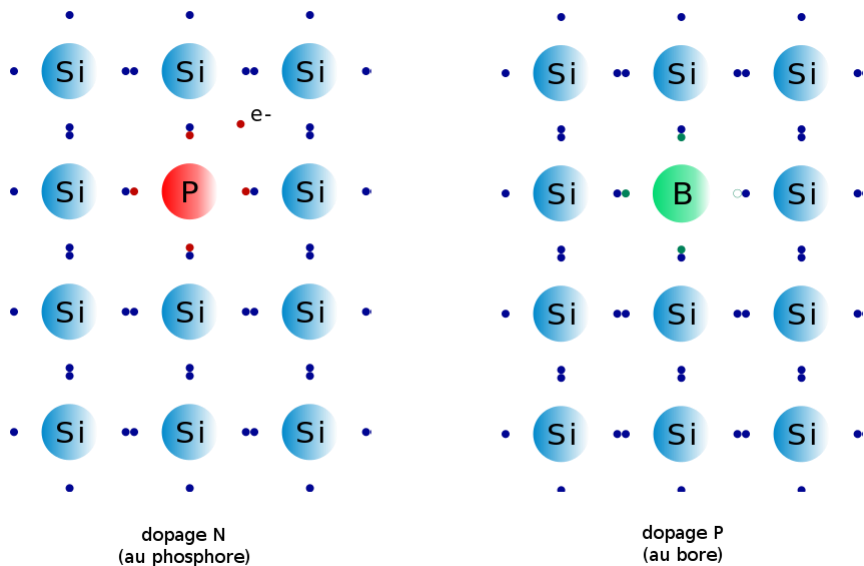
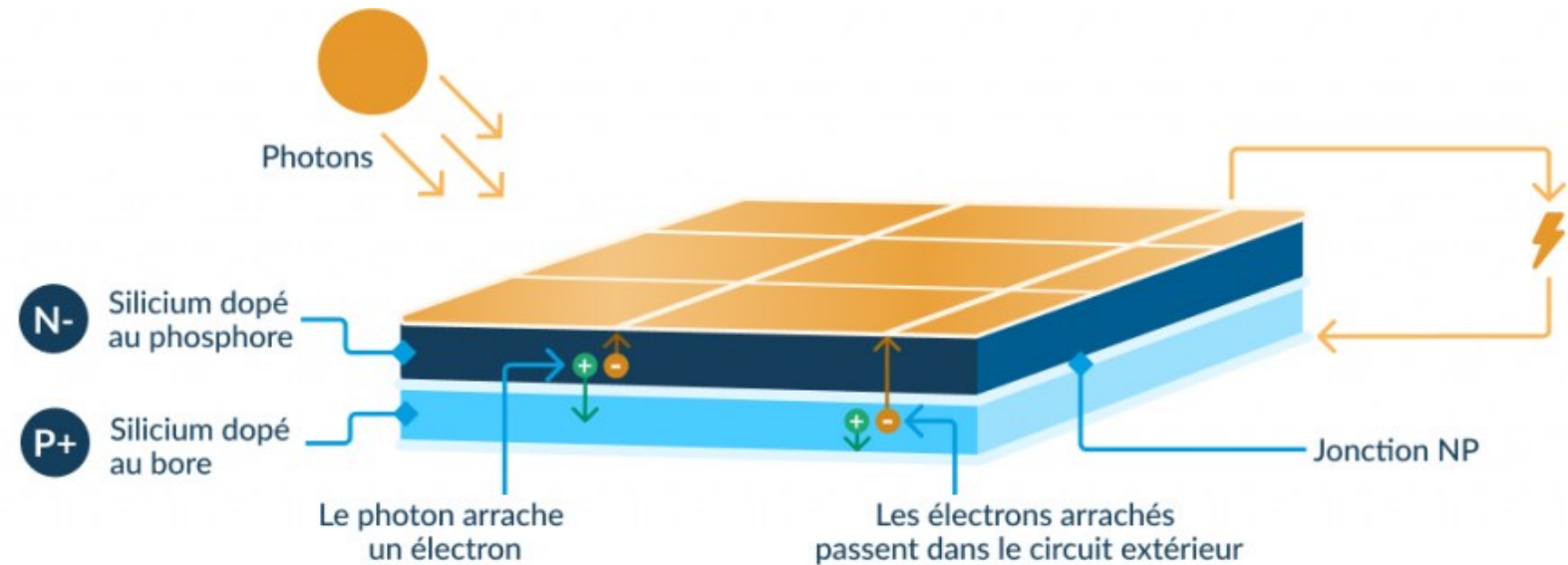


Figure 4 – L'effet photovoltaïque [4].



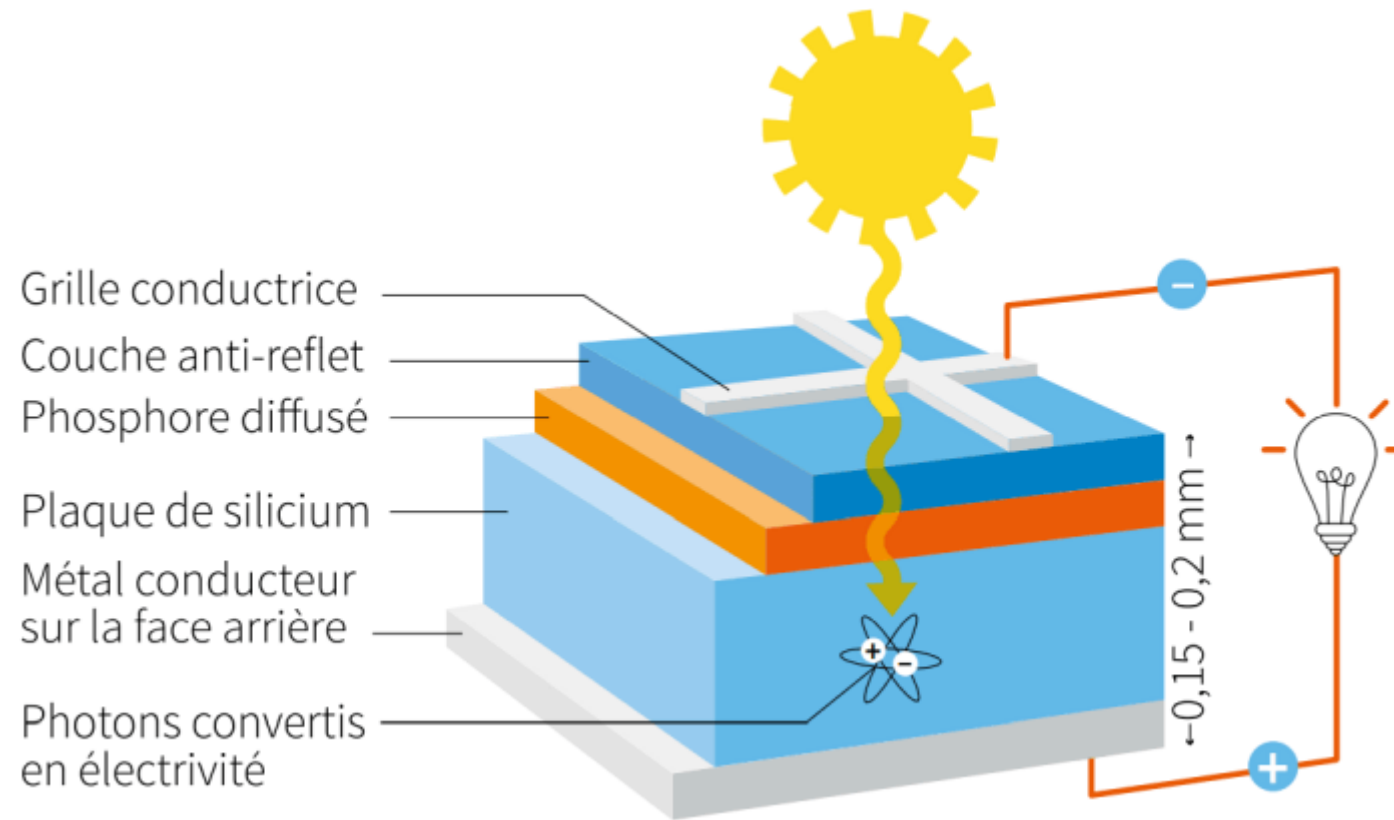
[3] <https://couleur-science.eu/?d=10d2d2--cest-quoi-un-semi-conducteur>

[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].

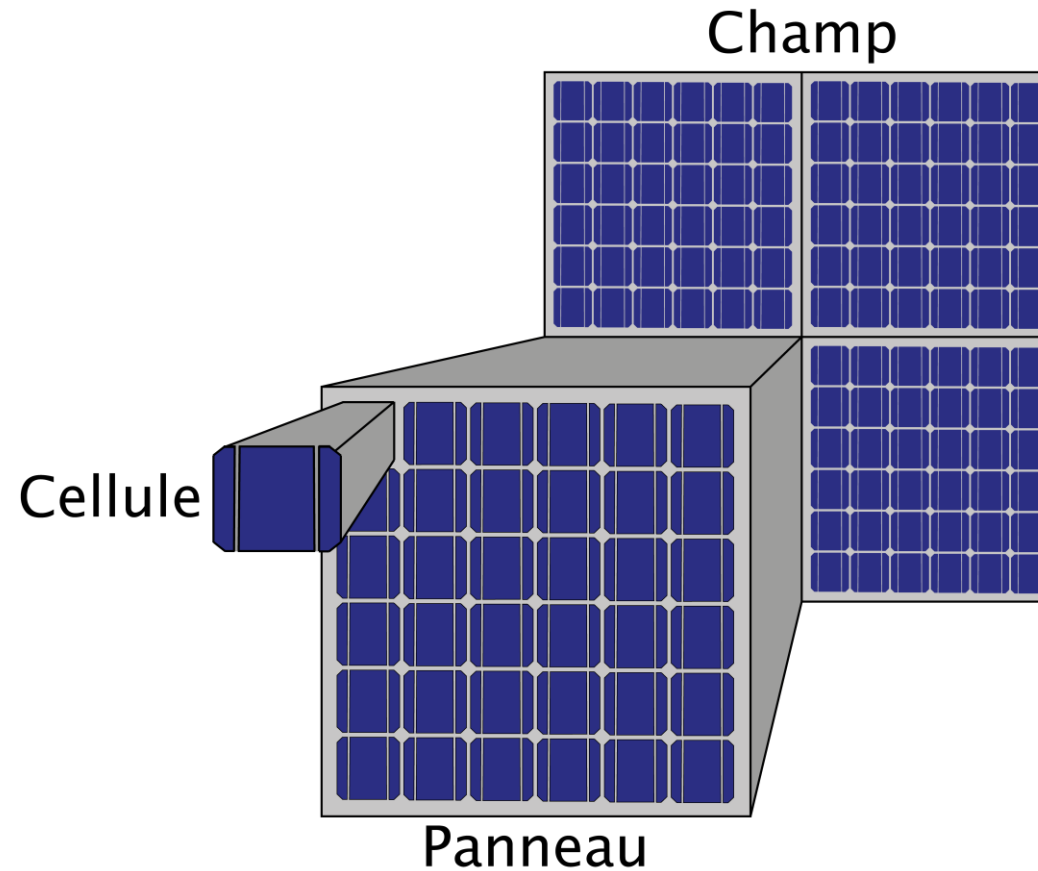


[5] <https://conseils-thermiques.org/contenu/fonctionnement-panneau-solaire.php>

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 [W/m^2]
- Puissance reçue du soleil par unité de surface
- Dépend principalement de :
 - L'**orientation** des modules PV
 - **Localisation** (ex. masse d'air)
 - **Moment** de la journée (heure)
 - L'**environnement** (ex. ombrage)
- Affecte, à l'échelle macroscopique, le **courant de sortie** de la cellule

Figure 7 – Irradiance journée ensoleillée [6].

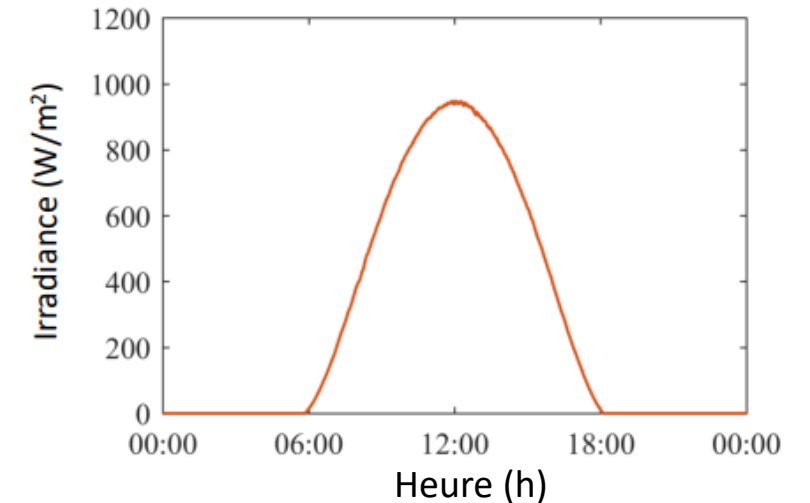
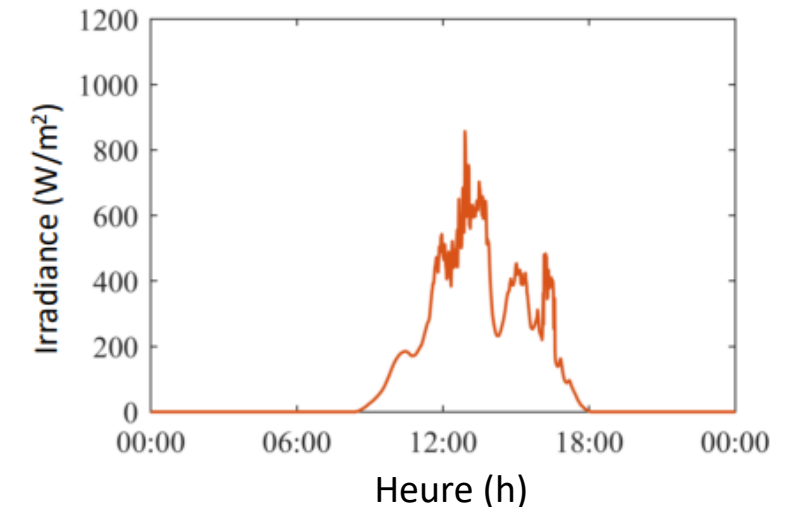


Figure 8 – Irradiance journée nuageuse [6].

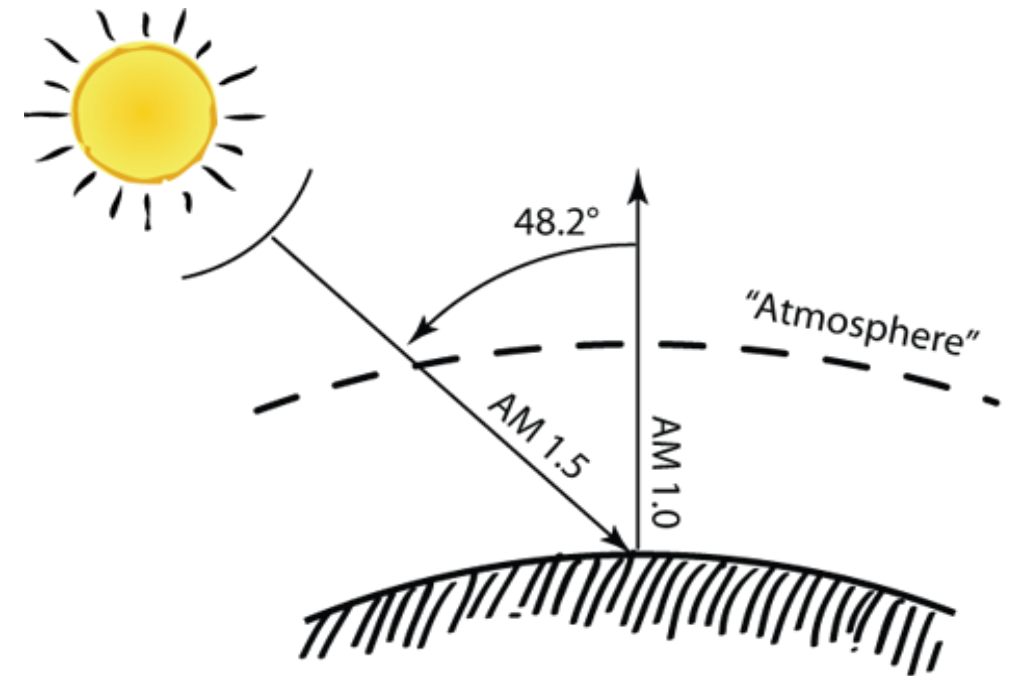


MASSE D'AIR

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

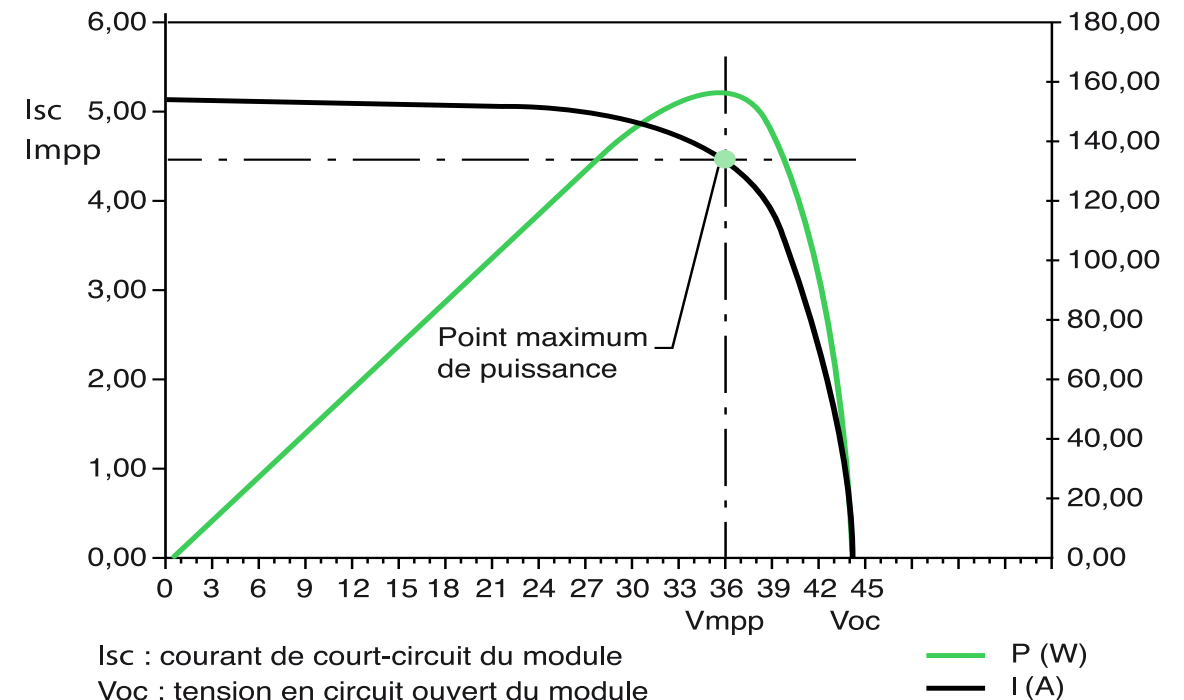
- T – Température de la cellule ou du module PV [°C ou K]
 - Ne doit pas être confondue avec la température de l'environnement T_{amb} !
- Un **facteur déterminant** pour la génération PV
- Liée à la **concentration de porteurs** dans le cristal de silicium
- Affecte, à l'échelle macroscopique, la **tension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

COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE

Notions de base du PV

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

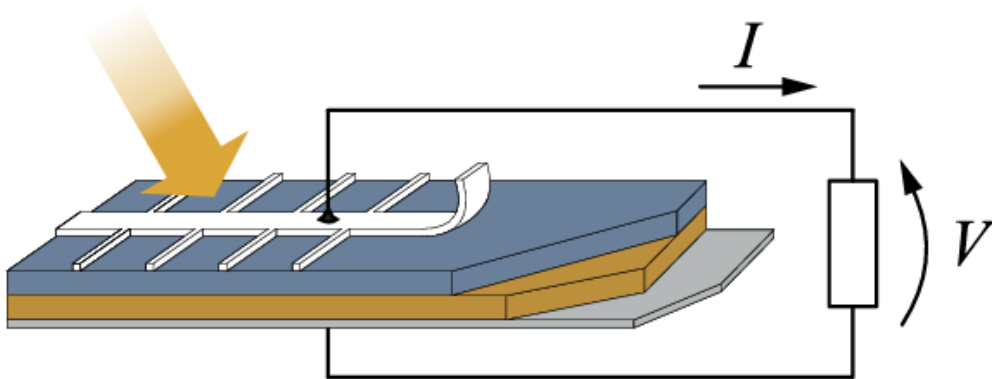
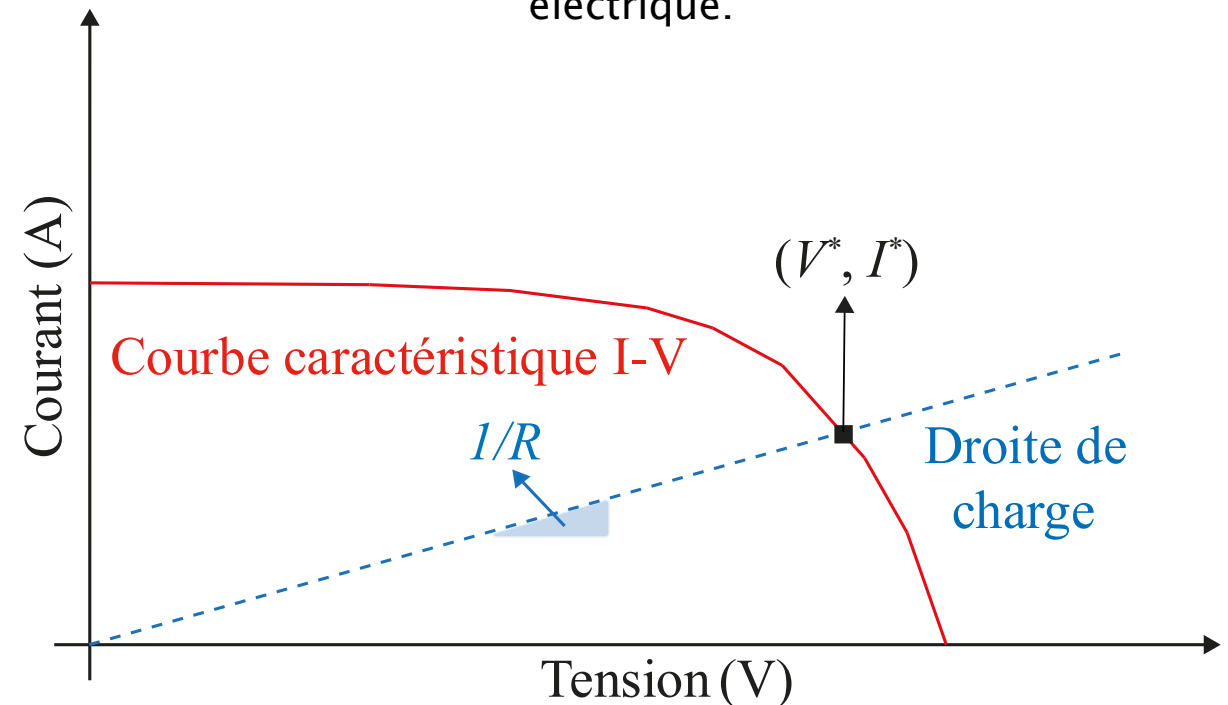


Figure 12 – Fonctionnement d'un panneau PV au niveau électrique.



[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 ² , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C | |
| ■ Electrical Performance at 800W/m ² , 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

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].

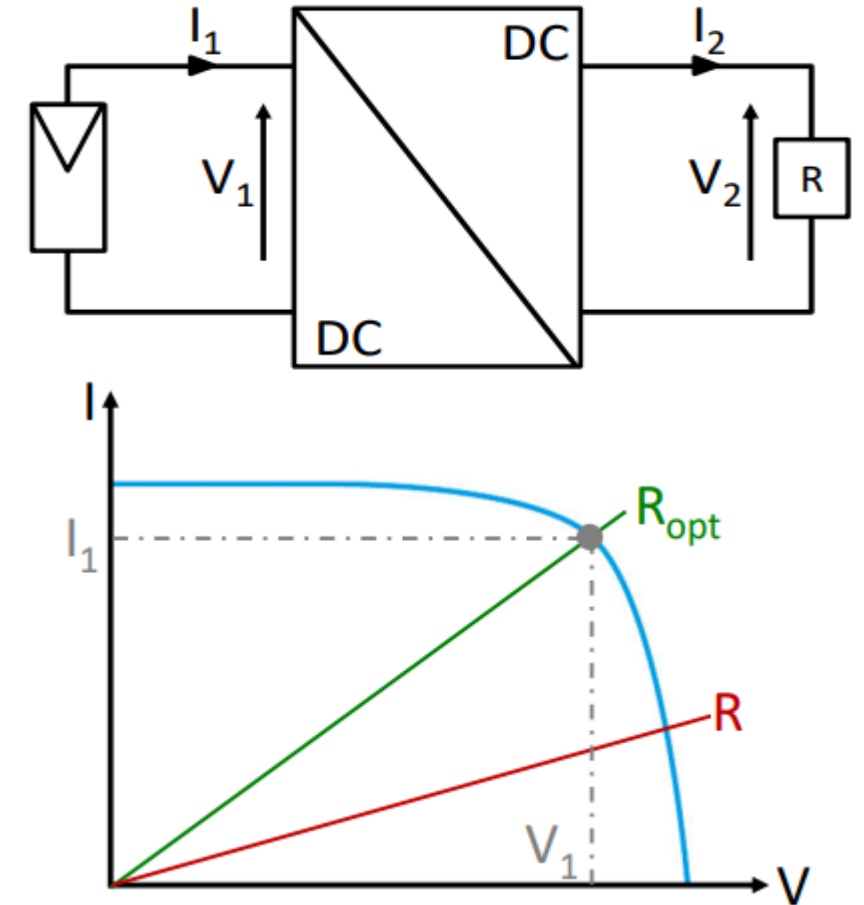
[11] <https://books.google.fr/books?id=HxdHDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=4oJUKmnFAT&dq=info%3AYMhXeMCq24IJ%3Ascholar.google.com&lr&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

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
- Éclairage LED

Figure 15 – Principe du MPPT [6].

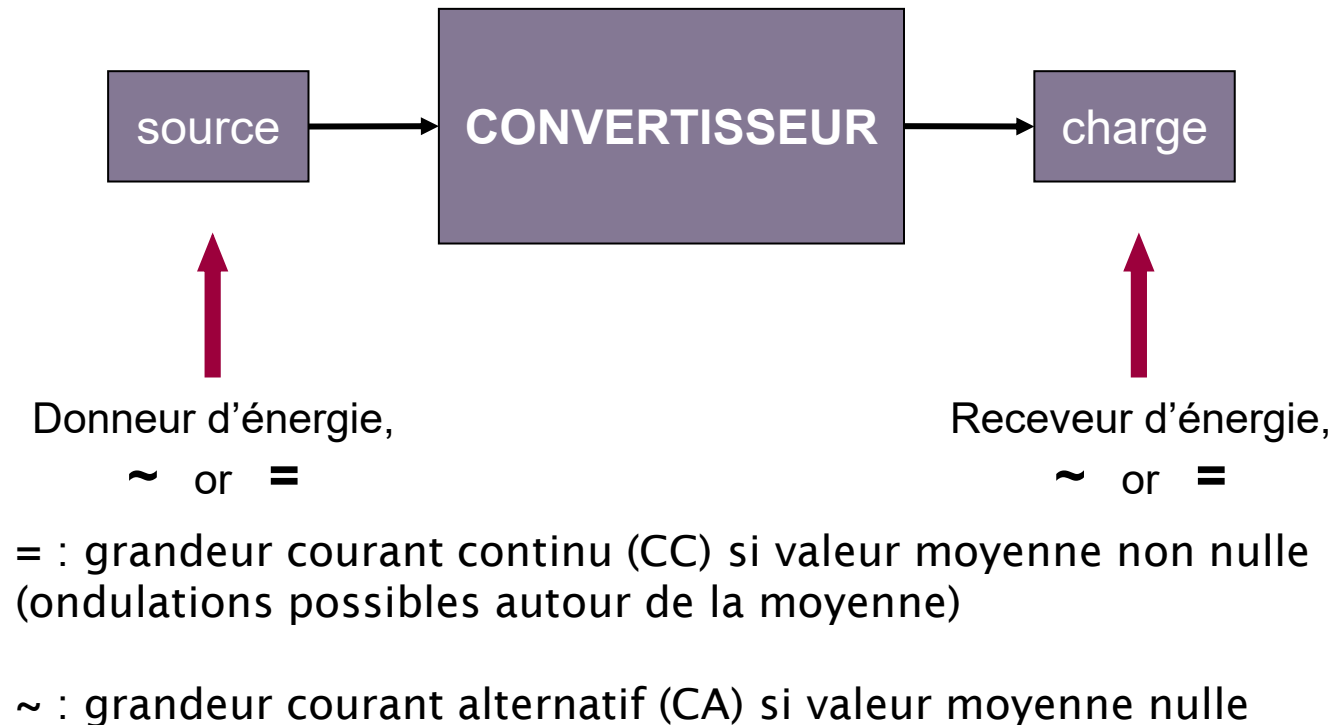


[6] S. Meunier, *Photovoltaic systems*, CentraleSupélec, CNRS, GeePs, Gif-sur-Yvette, France, 2025.

CONCEPTS FONDAMENTAUX

Notions de base de l'EP

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

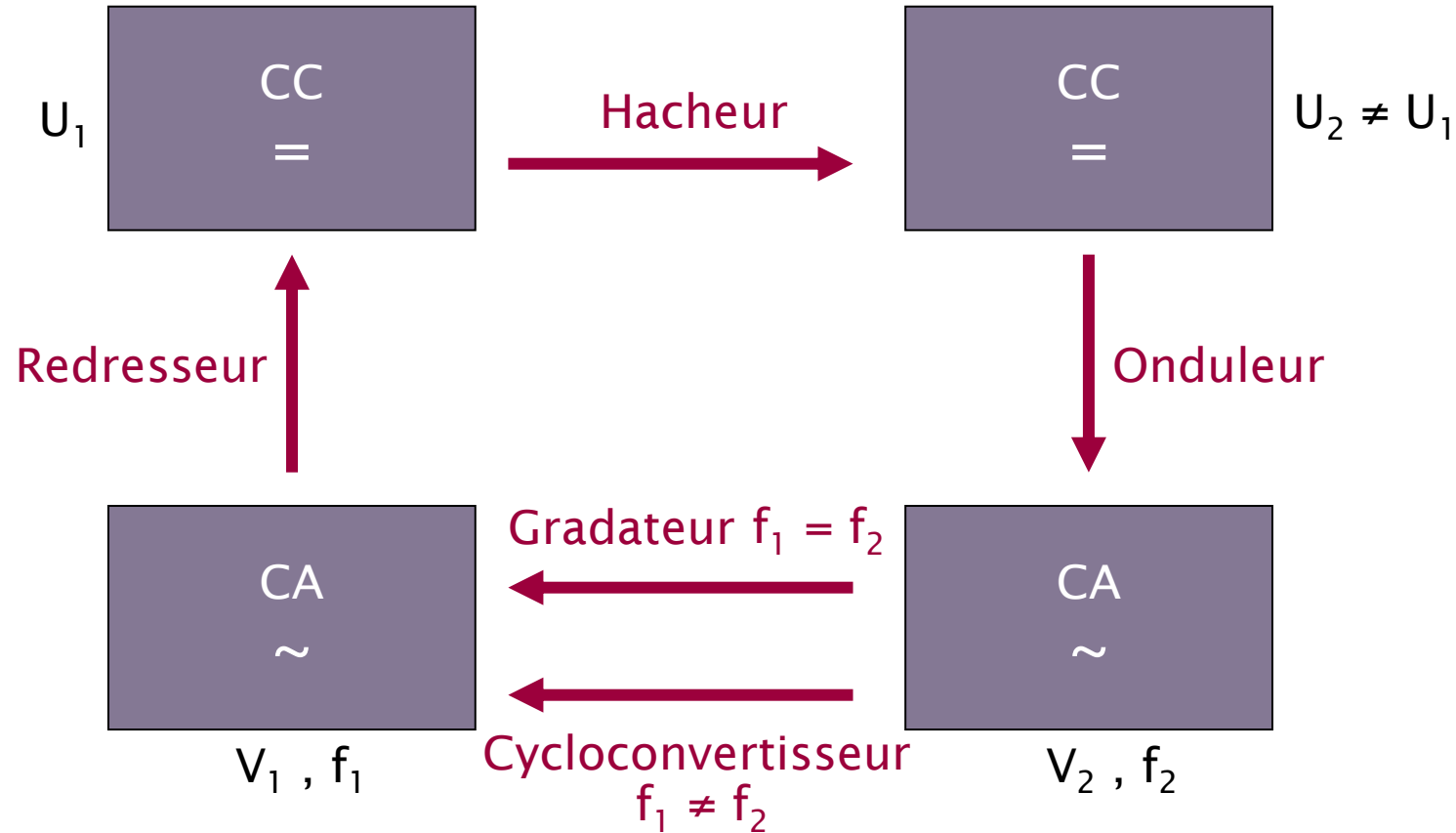


[12] M. Petit, *Conversion d'énergie : Introduction à la conversion électronique de puissance*, supports de cours, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Département SEE, France, 2025.

CONCEPTS FUNDAMENTAUX

Notions de base de l'EP

Figure 17 – Familles des convertisseurs [12].



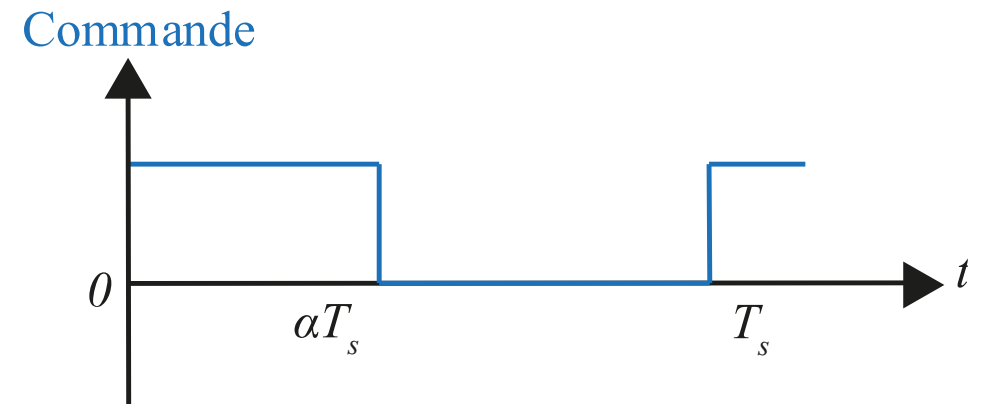
[12] M. Petit, *Conversion d'énergie : Introduction à la conversion électronique de puissance*, supports de cours, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Département SEE, France, 2025.

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.

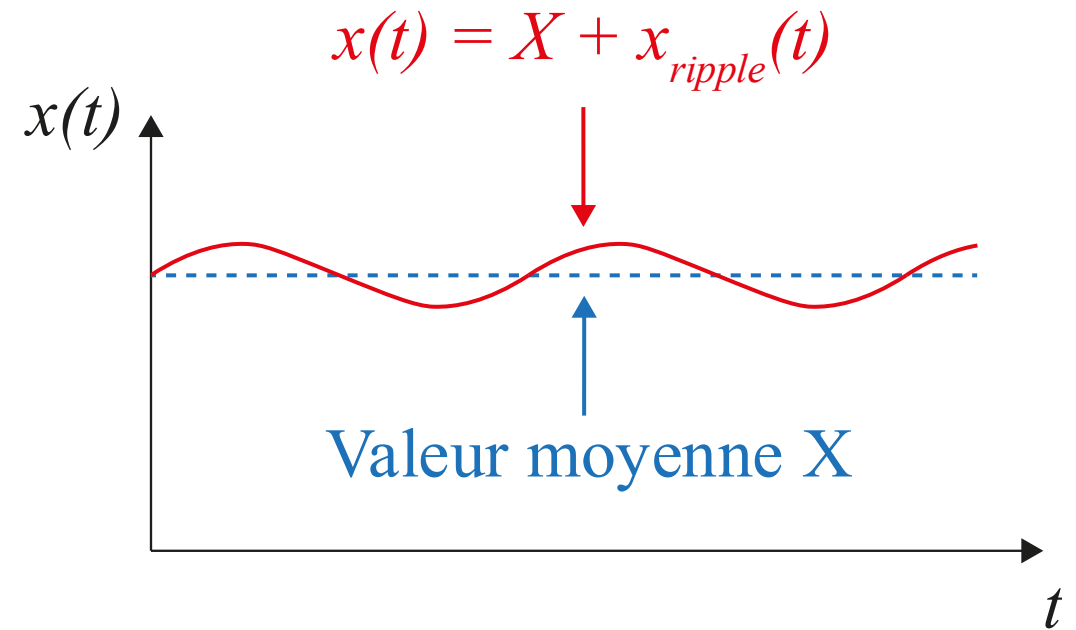


CONCEPTS FONDAMENTAUX

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)

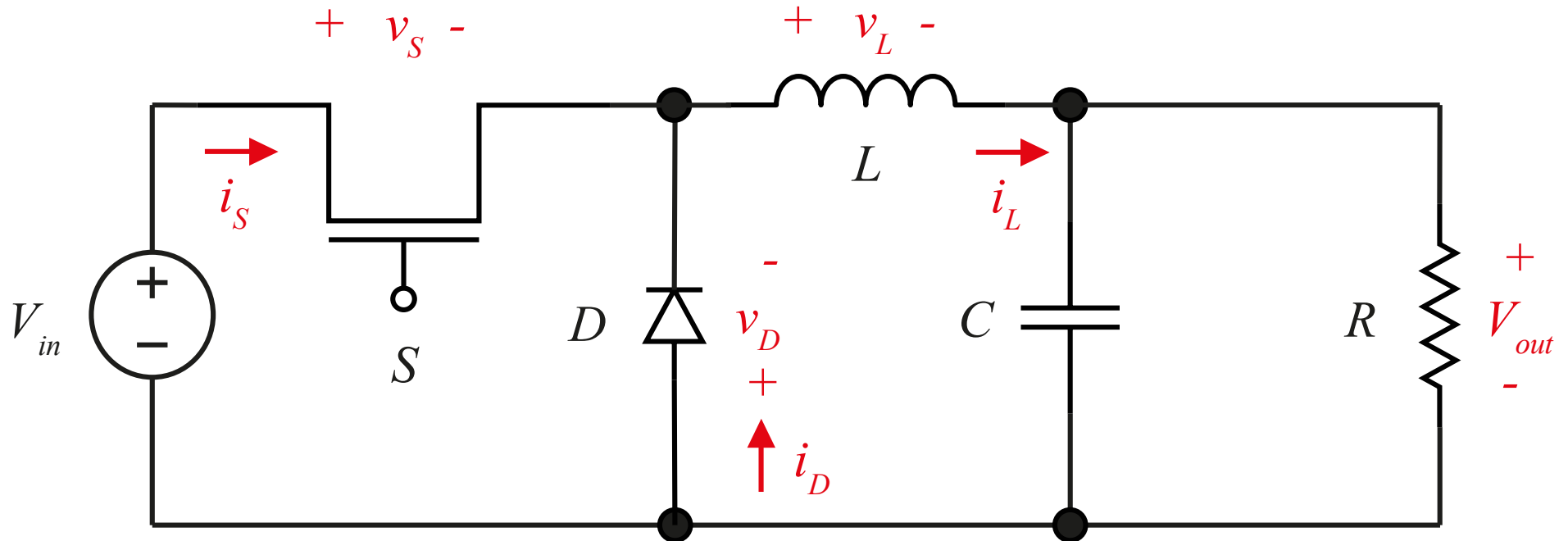
Notions de base de l'EP

- **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 $v_{out_{ripple}}(t) = 0$

HACHEUR BUCK

Notions de base de l'EP

Figure 20 – Hacheur Buck.



HACHEUR BUCK

Notions de base de l'EP

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

$$v_S(t) = 0$$

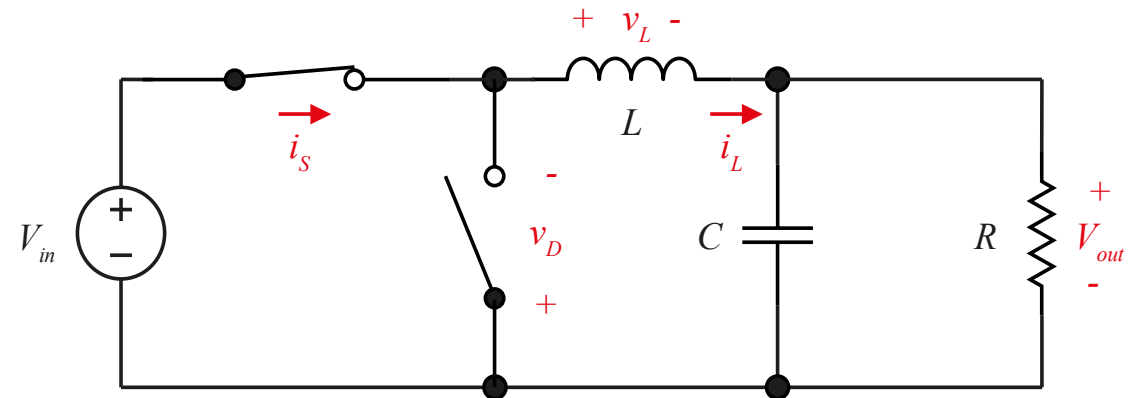
$$i_S(t) = i_L(t)$$

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

$$i_D(t) = 0$$

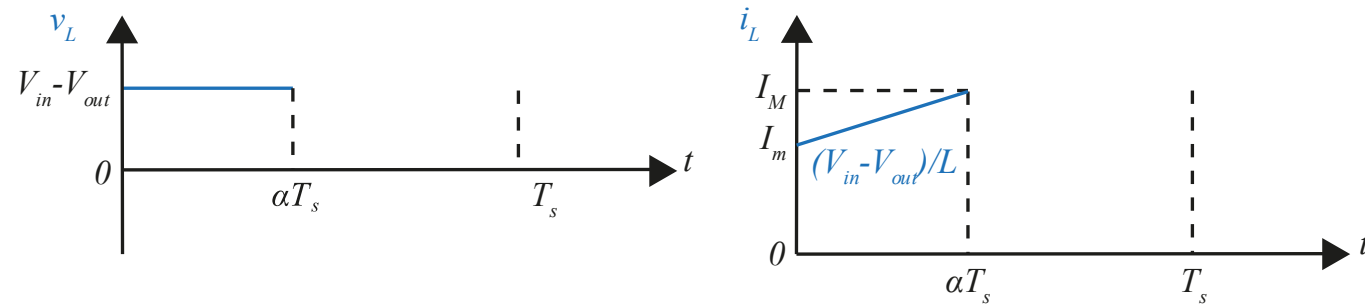
- Premier demi-cycle - $0 < t \leq \alpha \cdot T_s$

Figure 21 - Premier demi-cycle.



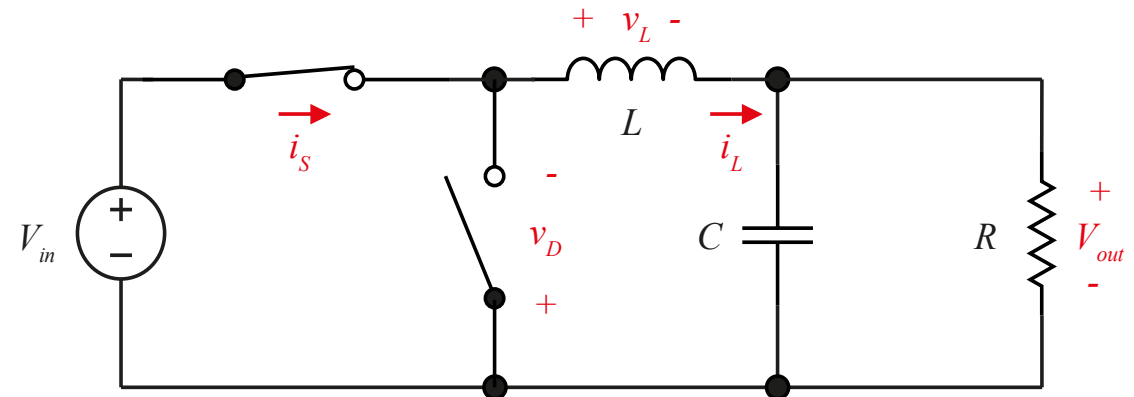
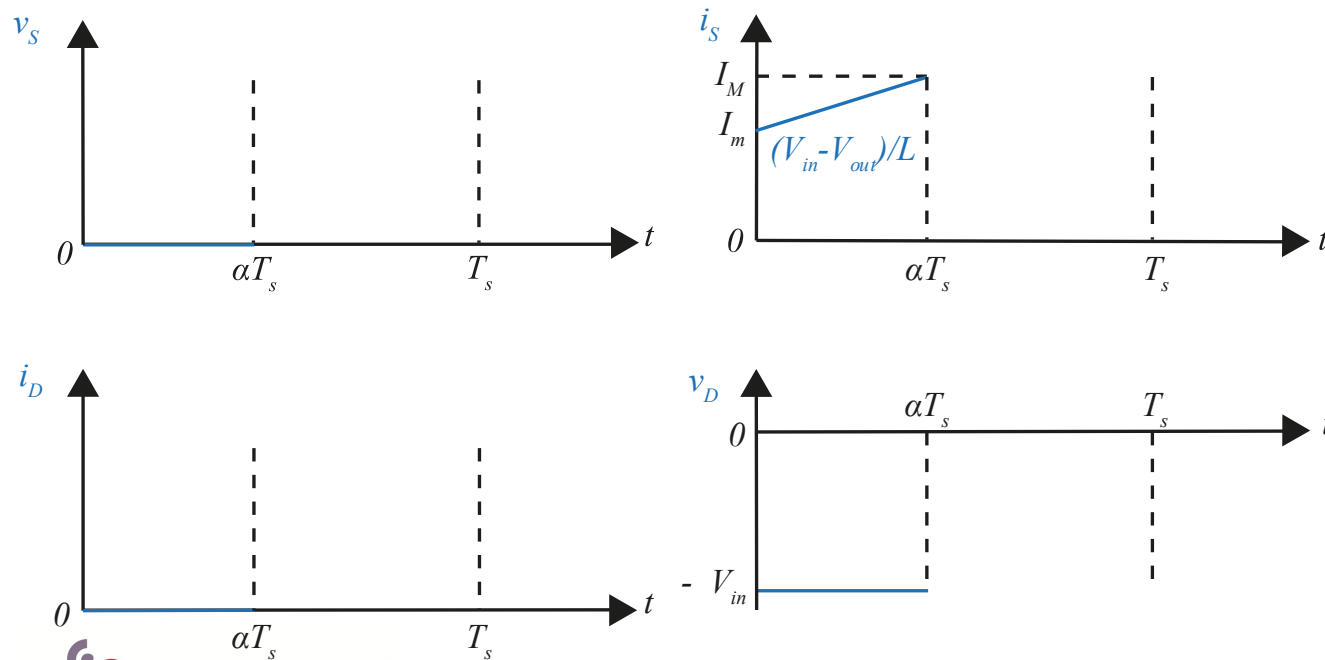
HACHEUR BUCK

Notions de base de l'EP



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

Figure 21 - Premier demi-cycle.



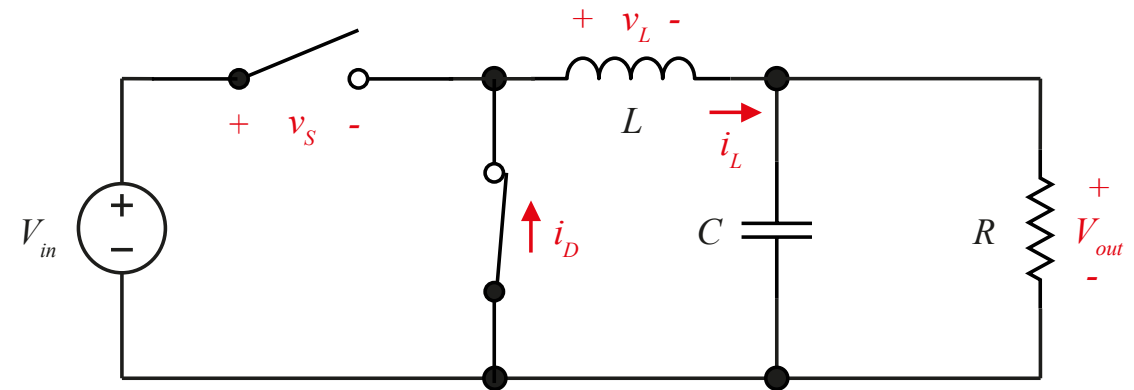
HACHEUR BUCK

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

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

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

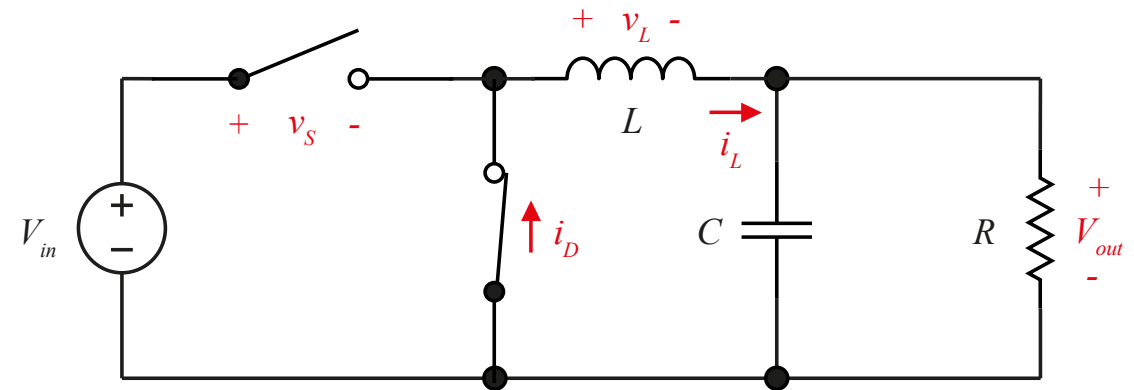
$$i_S(t) = 0$$

$$v_D(t) = 0$$

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

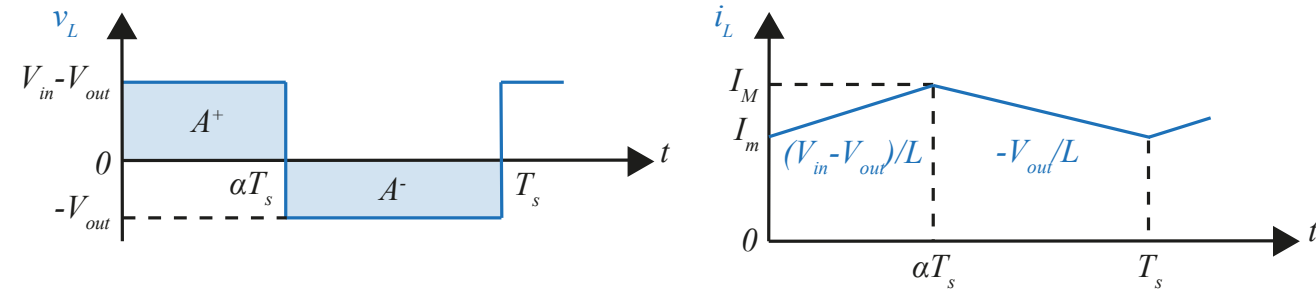
- Deuxième demi-cycle - $\alpha T_s \leq t \leq T_s$

Figure 22 - Deuxième demi-cycle.



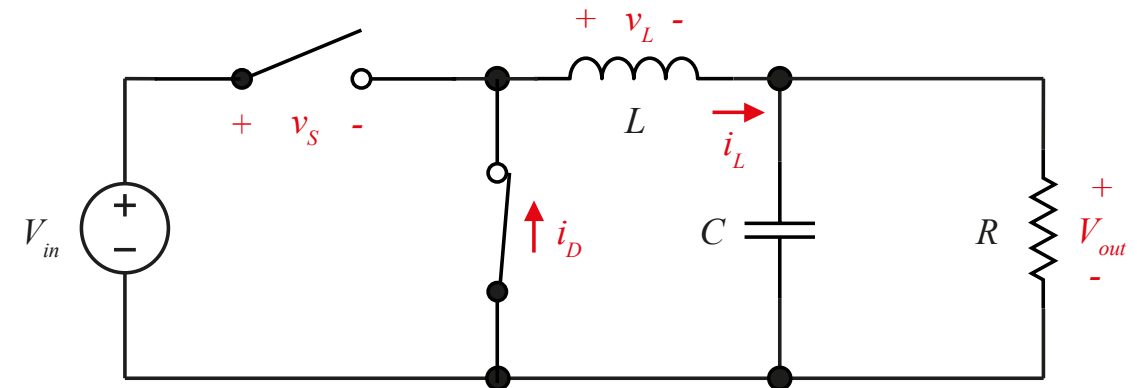
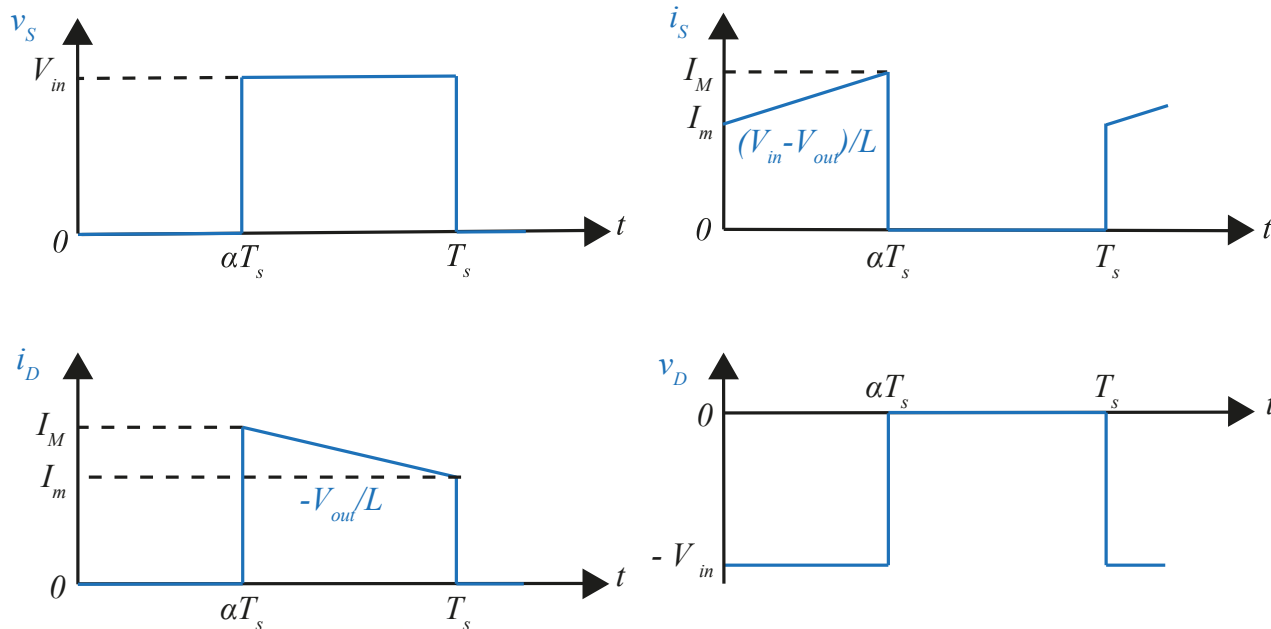
HACHEUR BUCK

Notions de base de l'EP



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

Figure 22 - Deuxième demi-cycle.

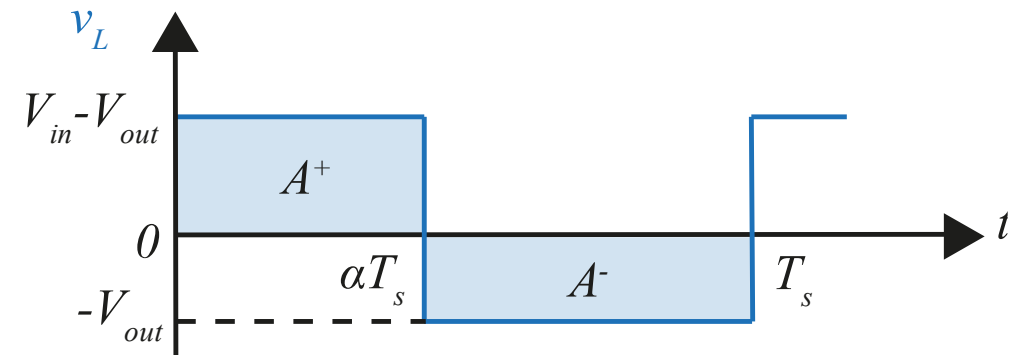


HACHEUR BUCK

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*

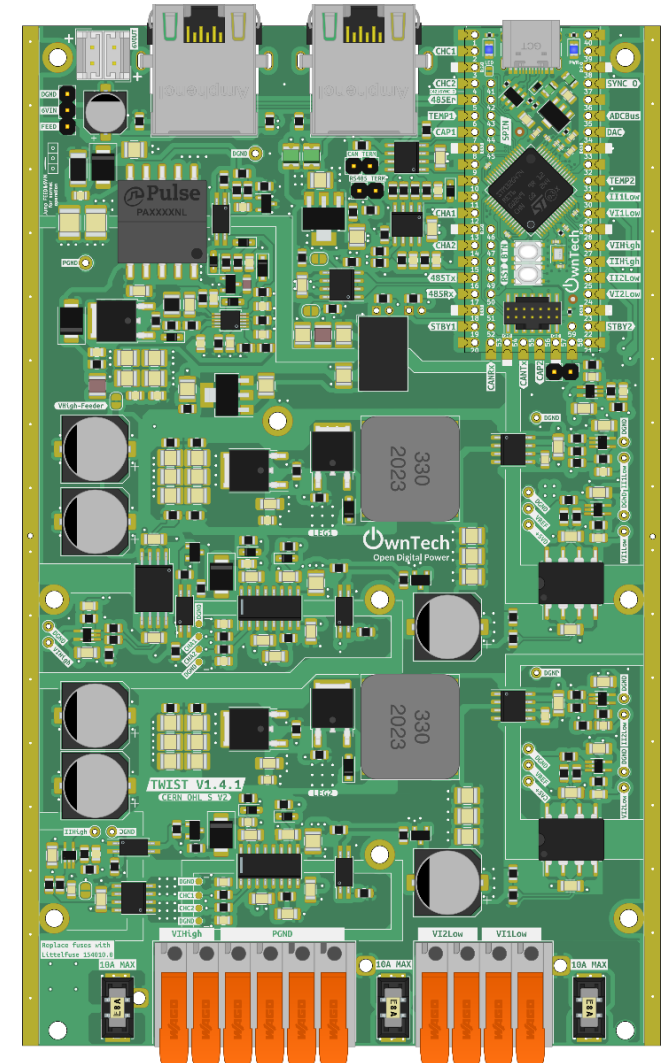
- Logiciels et algorithmes dont le code source est accessible publiquement, et que chacun peut utiliser, étudier, modifier et redistribuer
- Intérêts
 - Transparence
 - Gratuité
 - Diffusion du savoir
 - Innovation
 - Collaboration
 - Pérennité des projets

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].



[13] <https://github.com/owntech-foundation>

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*.

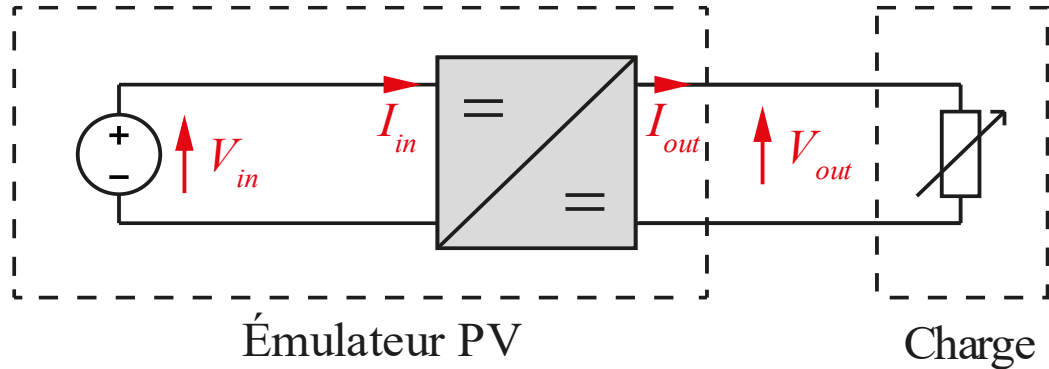
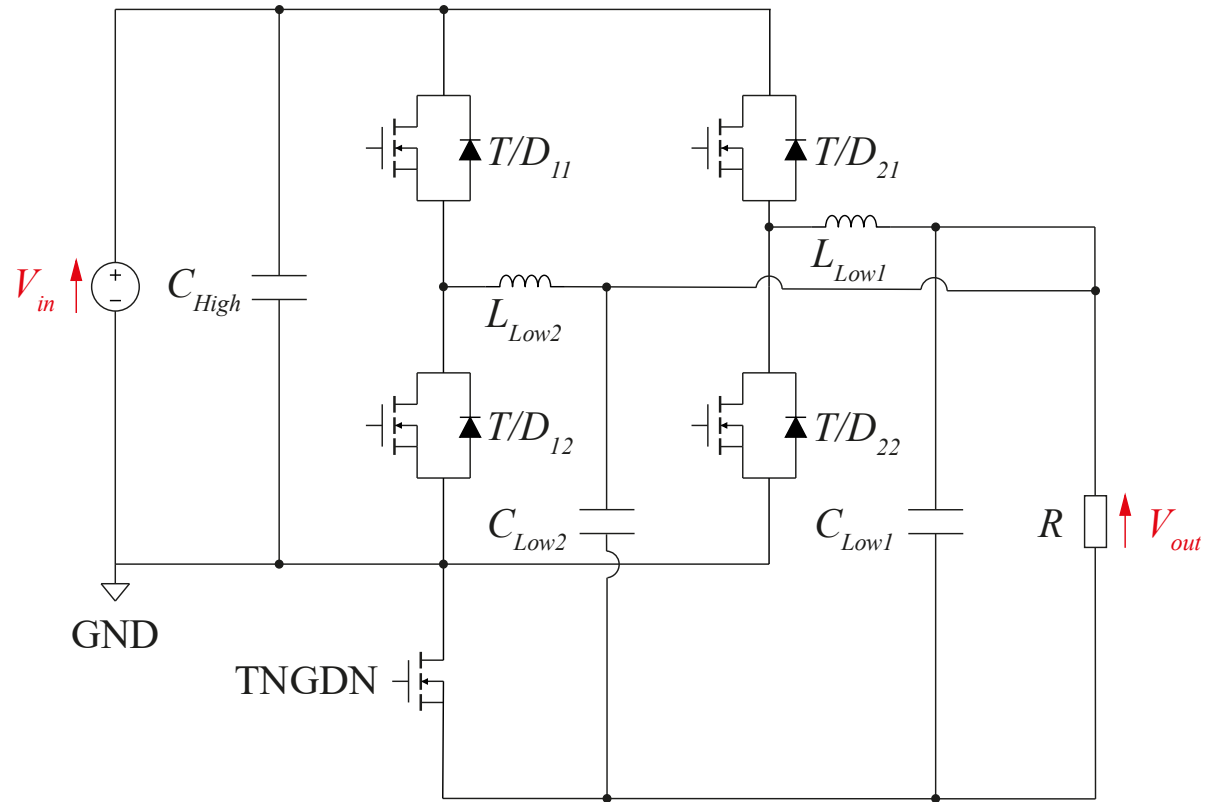


Figure 27 – Schéma détaillé de l'émulateur PV *open-source*.

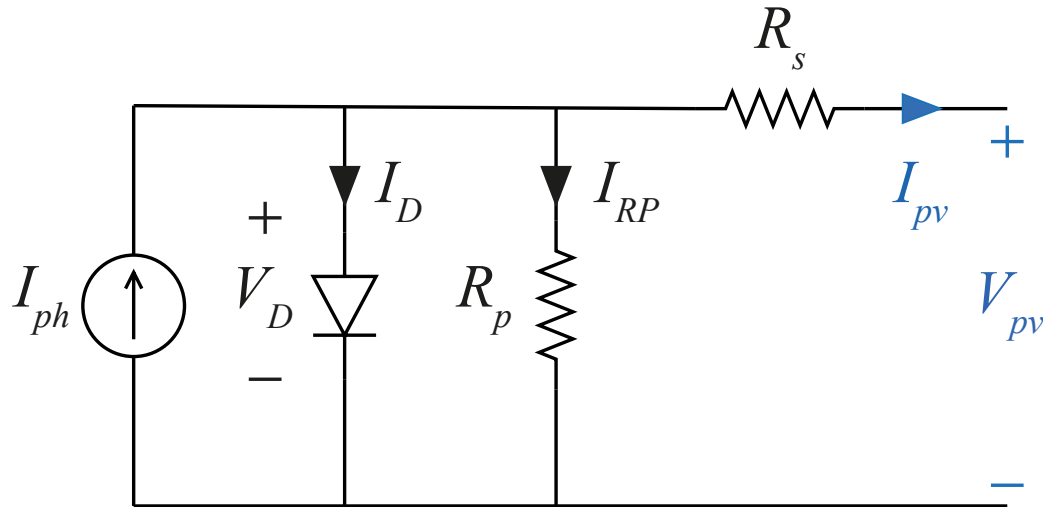


MODÈLE À UNE DIODE

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 [W/m^2]

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

α — 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 [Ω]

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 [Ω]

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

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

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

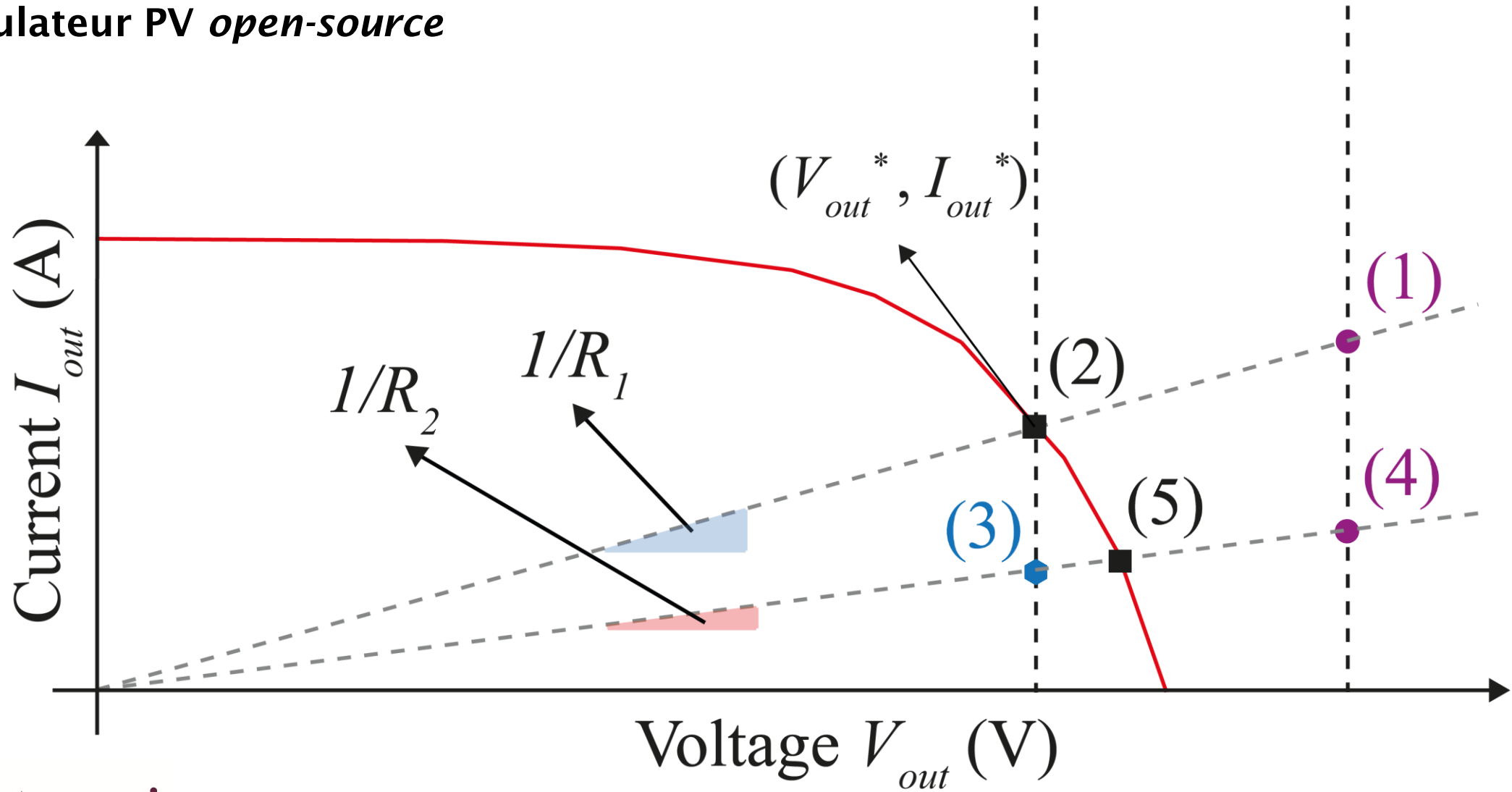
I_{sc}^{ref} — I_{sc} de référence [A]

β — 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).

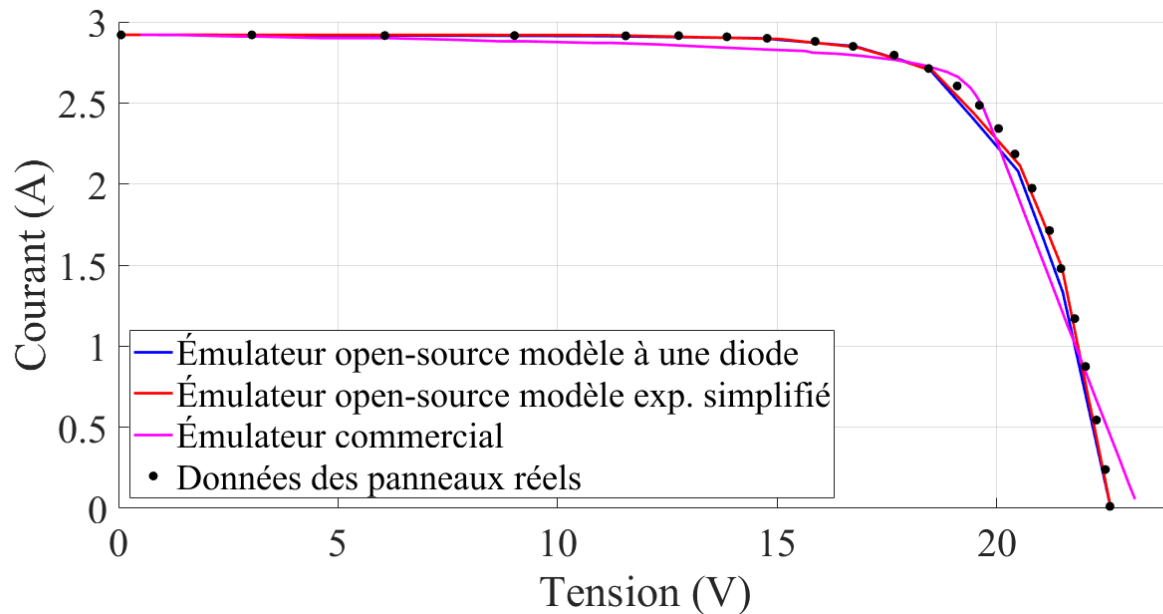
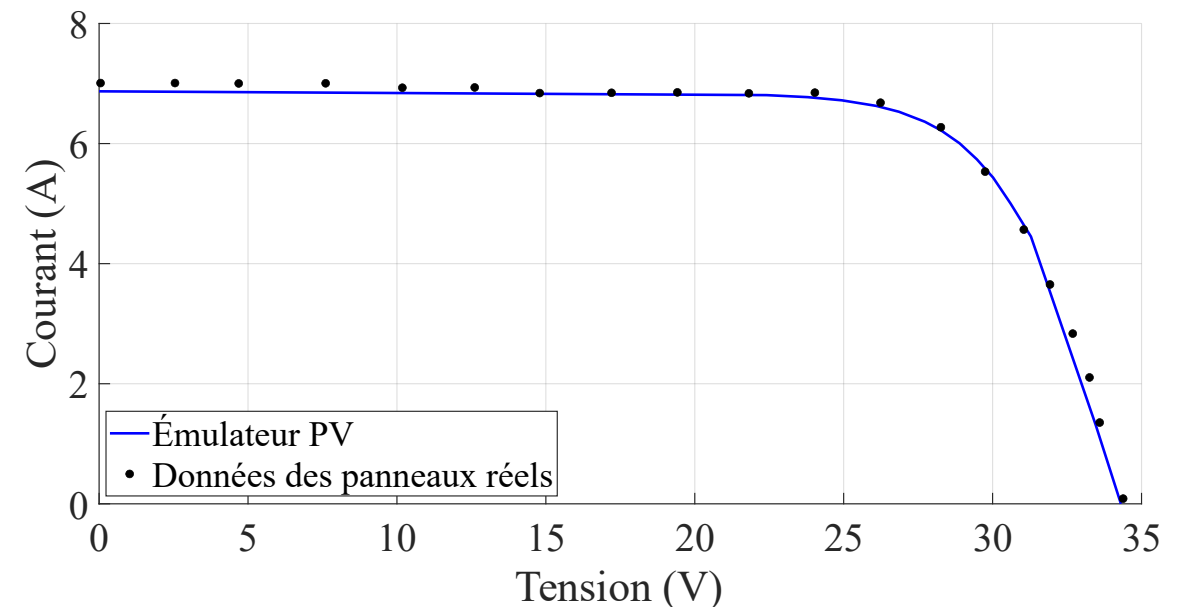


Figure 30 - Données du panneau réel vs émulateur PV - CanadianSolar CS6P-250P ($S = 765 \text{ W/m}^2$ et $T = 44,5^\circ\text{C}$).

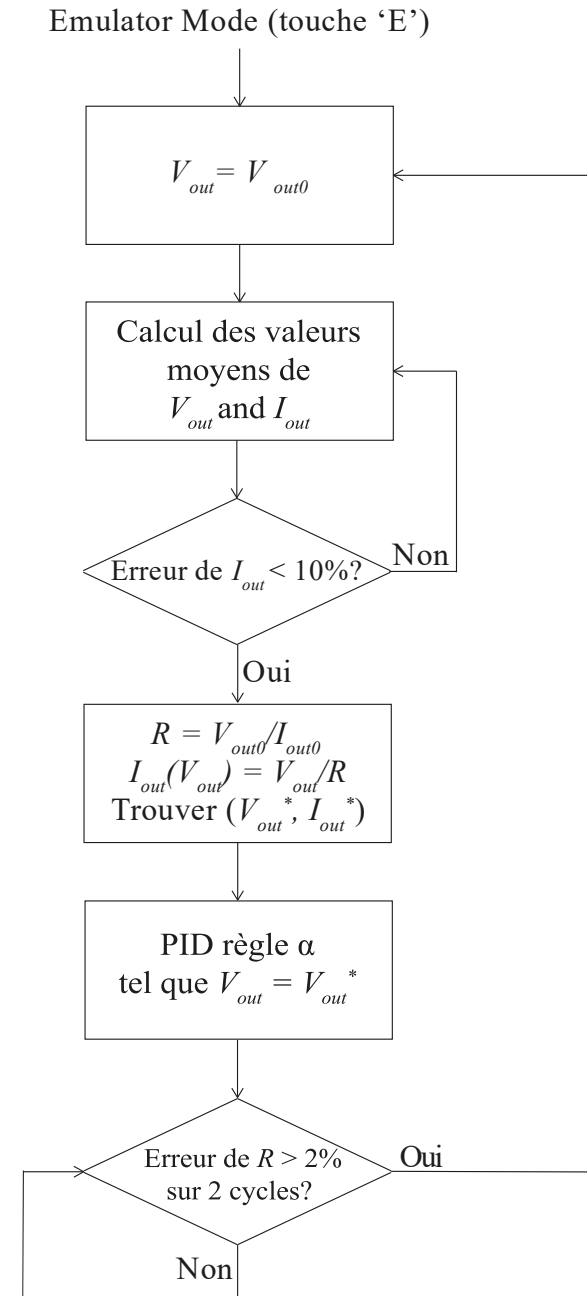


ALGORITHME

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 – 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**

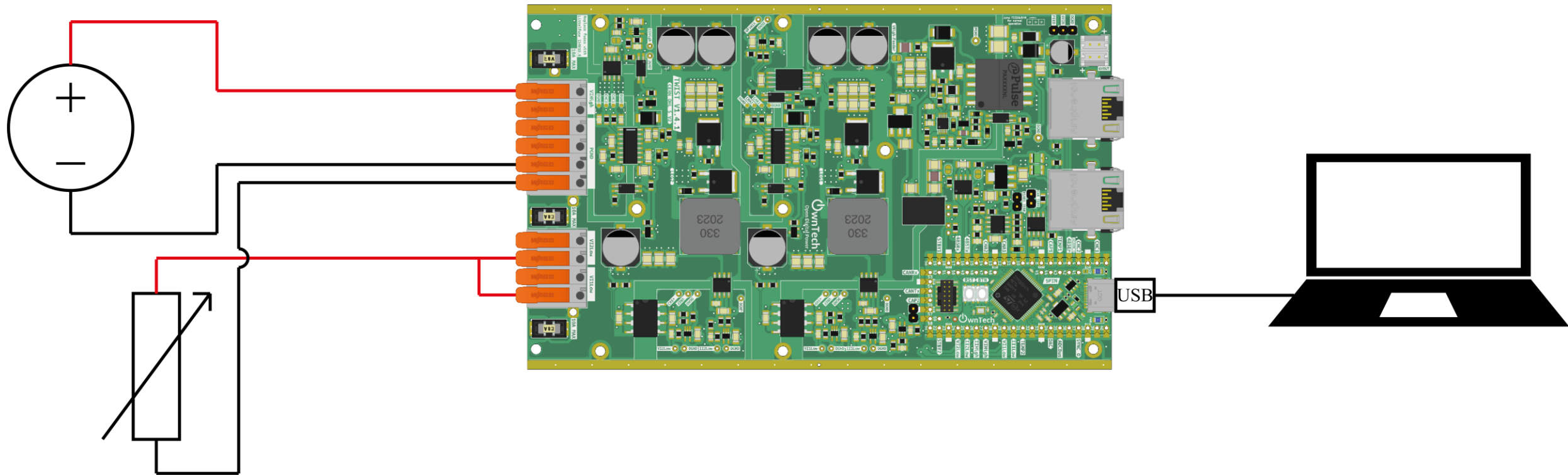
Questions ?

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 $T = 125 \text{ °C}$
 - $S = 200 \text{ W/m}^2$ et $T = 25 \text{ °C}$

PAUSE

15 MIN 

PARTIE PRATIQUE

1 H40

CONSIGNES

Partie pratique

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

ÉVALUATION

15 MIN

ÉVALUATION

Google Forms



REFERENCES

- [1] https://www.ren21.net/gsr-2025/downloads/pdf/supply/GSR_2025_Factsheet_Supply_SolarPV.pdf
- [2] 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-photovoltaïques/>
- [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_photovolta%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
- [11] <https://books.google.fr/books?id=HxdHDgAAQBAJ&lpg=PP1&ots=4oJUKmnFAT&dq=info%3AYMhXeMCq24IJ%3Ascholar.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>

Questions ?

gabriel.ceolindebrito@student-cs.fr

ANNEXES

ANNEXE A

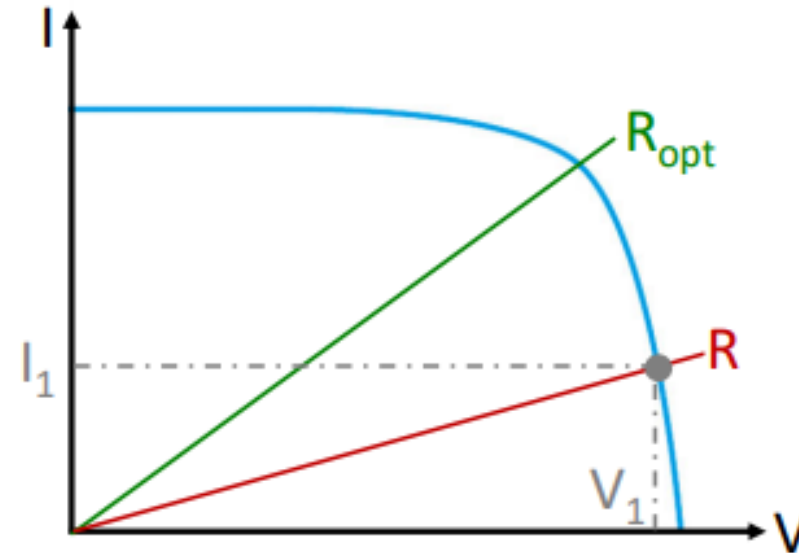
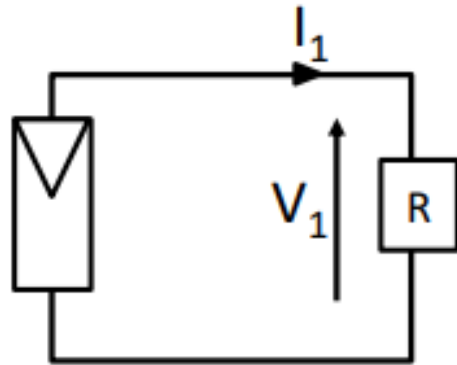
Estimation initiale de la valeur de la tension V_{oc} :

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

ANNEXE B

Operating point and maximum power point tracking

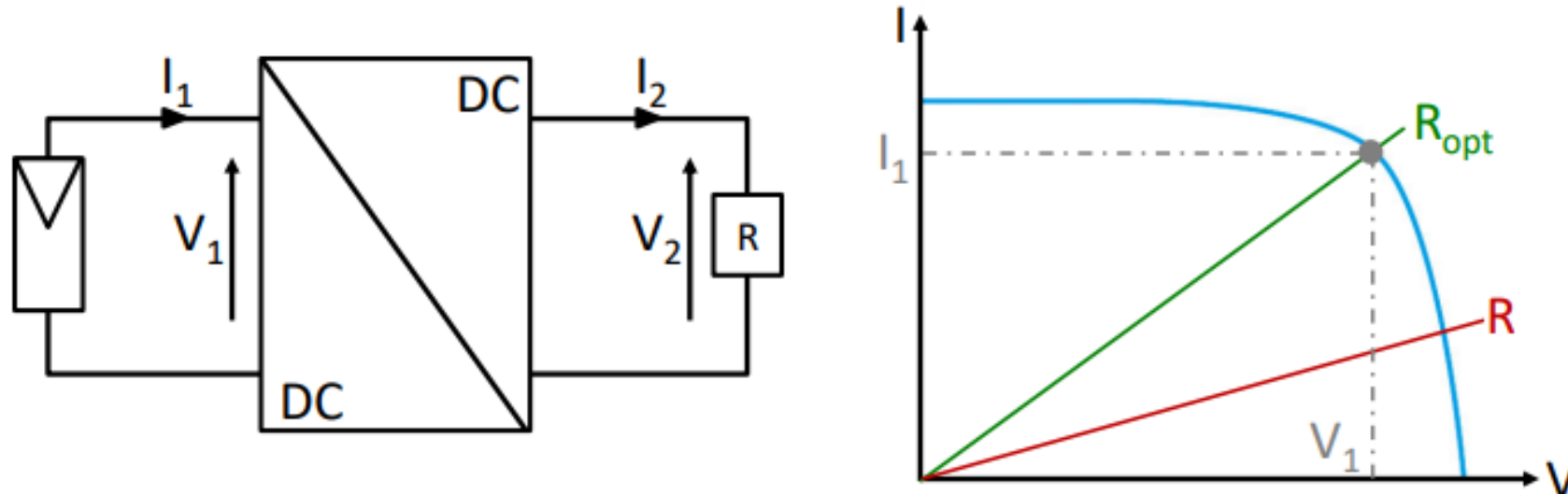
- The **operating point** of the photovoltaic module is determined by the **intersection** of its current-voltage characteristic and that of the connected load.
- In the situation below, the PV module does not produce its maximum possible power. Indeed, R imposes a ratio I_1/V_1 that is not optimal for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



ANNEXE B

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 $k = \sqrt{\eta \cdot R / R_{opt}}$ (η : 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.



ANNEXE B

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.

