

Principe de fonctionnement d'un régulateur de charge/décharge solaire

1 - Définition

Le régulateur de charge/décharge est associé à un générateur photovoltaïque, il a pour rôle de contrôler les flux d'énergie, de contrôler la charge de la batterie et sa protection contre les surcharges (solaires) et de limiter sa décharge profonde (utilisateurs). Sa fonction est primordiale, car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie.

Le régulateur peut assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles, inversions de polarité).

Il peut aussi utiliser pour commander la recharge des batteries par d'autres sources d'énergie (génératrices d'appoint, éolienne, etc.).

Il peut assurer la fonction du hacheur MPPT.

Le régulateur est utilisé pour contrôler la charge d'une batterie. Une charge trop élevée entraînera une électrolyse de l'eau en hydrogène et oxygène, ce qui pourra éventuellement amener les plaques en contact avec l'air et provoquera un vieillissement prématuré de la batterie. La formation de l'hydrogène représente également un risque certain d'explosion dans un local peu ventilé.

La tension est le paramètre le plus utilisé pour faire cette tâche. Car la tension d'une batterie, chargée à courant constant, augmente de façon linéaire jusqu'à ce qu'elle atteigne pratiquement la fin de charge où soudainement elle augmente beaucoup plus rapidement lorsque sa matière active est presque complètement transformée et où l'électrolyte commence de libérer des gaz.

Le régulateur a la fonction de déconnecter l'alimentation par batterie (déconnecter les consommateurs) lorsque l'état de charge de la batterie descend au-dessous d'un certain seuil critique. Ce seuil dépend de plusieurs facteurs à savoir la durée de vie espérée, la température ambiante et le niveau de courant. Plus que le seuil est élevé plus que la durée de vie de la batterie augmente mais la capacité non utilisée réduira sa capacité totale pour une même autonomie. Il est à noter que le seuil de délitage dépend également de l'âge de la batterie (en vieillissant, celle-ci perd un peu de tension). Donc il faut que la tension du seuil doive être contrôlée en fonction des années de service.

Comme la charge excessive est néfaste, la décharge l'est aussi; la décharge profonde répétée provoque une sulfatation irréversible des plaques et par conséquent une diminution de la capacité de la batterie. Elle peut également provoquer des courts circuits entre les plaques et rendre l'accumulateur inopérant.

2. Technologie des régulateurs

On trouve sur les installations plusieurs technologies de contrôleur de charge :

- Régulation tout ou rien (TOR) par coupure (relai de déconnection) électromécanique. Ce type de régulateur est plus simple et est amené à disparaître.
- Régulation MLI (à modulation de largeurs d'impulsions) ou en anglais PWM.
- Régulation avec couplage par adaptateur d'impédance appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

2.1 Régulation tout ou rien (TOR)

C'est un élément utilisant un interrupteur (relai électromécanique) qui s'ouvre ou se ferme selon l'état de la batterie. Deux types de régulateurs sont utilisés; l'un est dit shunt dont le principe est montré dans la figure 1 et l'autre dit en série figure 2. L'appellation Tout Ou Rien (TOR) est due principalement aux deux modes de fonctionnement ; mode de raccordement simultané des deux sources PV et Batterie à la charge (Tout), et mode de déconnection totale des sources par rapport à la charge (Rien).

2.1.1 Régulateur shunt de charge

a. Constitution d'un régulateur shunt de charge

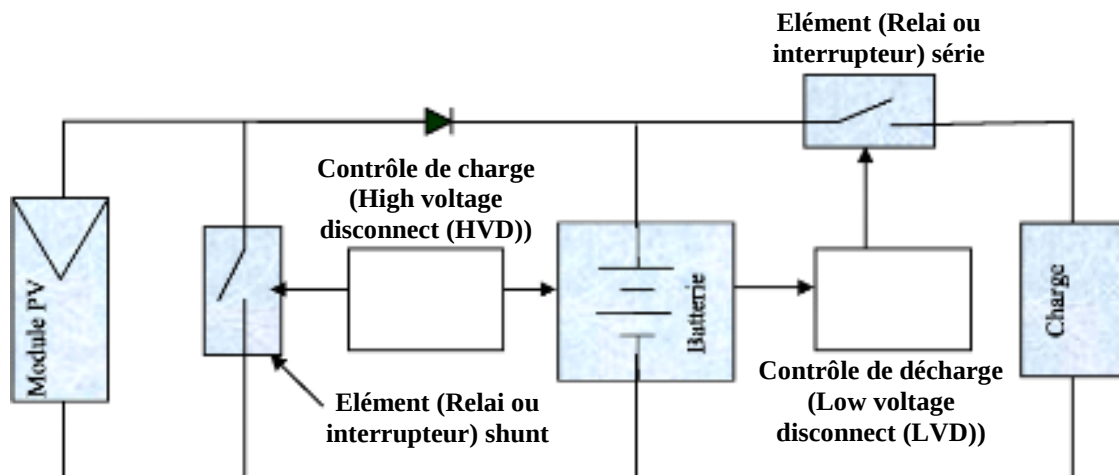


Fig. 1 : Configuration d'un régulateur shunt

Ce schéma représente le **synoptique d'une installation photovoltaïque autonome** équipée d'un régulateur de charge de type shunt (structure shunt d'un régulateur solaire). L'appellation 'shunt' est principalement due au raccordement en parallèle d'un relai (interrupteur) inséré entre le module PV et la batterie de stockage.

Voici le rôle de chaque composant de cette configuration:

- **Module PV (Panneau Photovoltaïque)** : Capte l'énergie solaire et la convertit en courant continu.
- **Diode (en haut au centre)** : Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin :
 - d'empêcher le court-circuit de la batterie, lorsque l'interrupteur shunt est fermé ;
 - d'empêcher le courant de la batterie de retourner dans les panneaux pendant la nuit ou le courant PV est nul (diode anti-retour) et lorsque l'interrupteur shunt est ouvert.
- **Batterie** : Stocke l'énergie produite pour une utilisation ultérieure, notamment quand il n'y a plus de soleil.
- **Interrupteurs (Relais) et Blocs de contrôle (Régulateurs)** :
 - L'interrupteur à gauche (shunt) permet de déconnecter le panneau quand la batterie est pleine pour éviter sa surcharge et sa surtension (High Voltage (HV)). Cet interrupteur est contrôlé par le bloc de contrôle de charge (High voltage disconnect (HVD)).
 - L'interrupteur en haut à droite (série) protège la batterie contre les décharges profondes (Sous Tension ou Low Voltage (LV)) en coupant (déconnectant) la charge si la tension est trop basse (Low Voltage (LV)). Cet interrupteur est contrôlé par le bloc de contrôle de décharge (Low voltage disconnect (LVD)).
- **Charge** : Représente les appareils électriques (lampes, moteurs, etc.) qui consomment l'énergie.

b. Mode de fonctionnement d'un régulateur shunt de charge

Typiquement le régulateur shunt peut fonctionner selon 3 modes:

- Mode '1' : L'interrupteur à gauche (shunt) sera fermé pour permettre de déconnecter le panneau en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque, quand la batterie est pleine pour éviter sa surcharge et sa surtension (High Voltage (HV)). Cet interrupteur est contrôlé par le bloc de contrôle de charge (High voltage disconnect (HVD)). Dans ce cas la charge est alimentée par la batterie à travers l'interrupteur en série de la sortie qui sera fermé.
- Mode '2' : L'interrupteur en haut à droite (série) protège la batterie contre les décharges profondes (Sous Tension ou Low Voltage (LV)) en s'ouvrant pour couper (déconnecter) la charge si la tension de la batterie est trop basse (Low Voltage (LV)). Cet interrupteur est contrôlé par le bloc de contrôle de décharge (Low voltage disconnect (LVD)). Dans ce cas l'interrupteur shunt s'ouvre afin de permettre à la batterie de se charger.
- Mode '3' : L'interrupteur en haut à droite (série) se ferme permettant à la batterie d'alimenter la charge si la tension de la batterie est dans l'intervalle nominale de fonctionnement. Dans ce cas l'interrupteur shunt s'ouvre afin de permettre au module PV d'alimenter lui aussi la charge en parallèle avec la batterie.

2.1.2 Régulateur série de charge

a. Constitution d'un régulateur série de charge

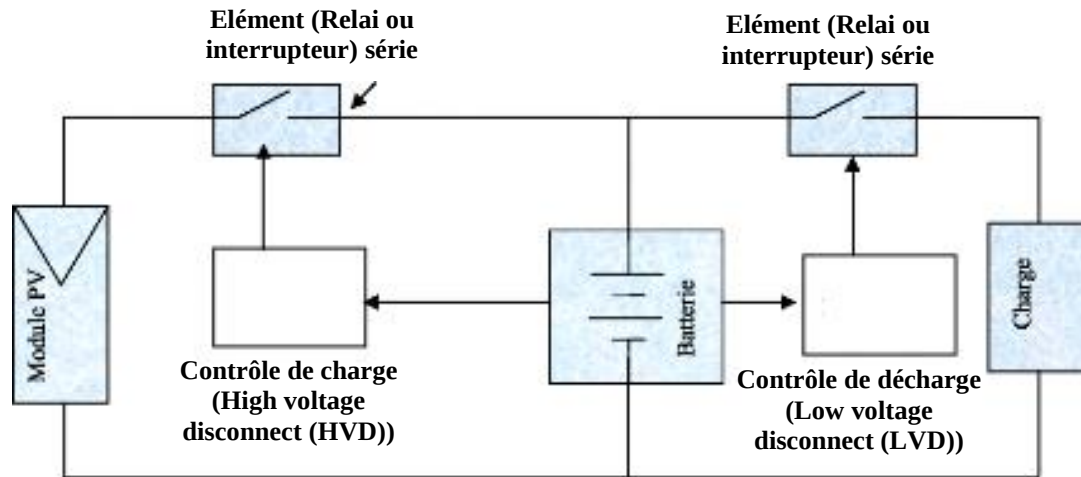


Fig. 1 Configuration d'un régulateur série

Ce schéma illustre le **principe de fonctionnement d'un régulateur de charge de type série** au sein d'une installation solaire autonome. L'appellation 'série' est principalement due au raccordement en série d'un relai inséré entre le module PV et la batterie de stockage.

Voici le rôle de chaque composant de base de cette configuration:

- **Module PV** : Le générateur qui transforme la lumière en électricité.
- **Batterie** : Le réservoir d'énergie.
- **Charge** : Vos appareils électriques (lampes, radio, etc.).

b. Mode de fonctionnement d'un régulateur shunt de charge

Typiquement le régulateur série peut fonctionner selon 3 modes:

- Mode '1 Contrôle de Charge' : On surveille en permanence la tension de la **Batterie**. Si la batterie est pleine (tension maximale atteinte), on commande l'ouverture de l'interrupteur du haut à gauche (entrée) pour déconnecter le **Module PV**. Cela évite de détériorer la batterie par une surcharge.

- Mode '2 Contrôle de décharge' : On surveille si la tension de la Batterie devient trop faible. Si la batterie est presque vide, il ouvre l'interrupteur de droite (sortie) pour couper l'alimentation de la **Charge**. Cela protège la batterie contre une "décharge profonde" qui pourrait l'endommager définitivement.
- Mode '3 Contrôle Normal' : Si la tension de la Batterie est dans l'intervalle nominal de fonctionnement, on ferme les deux interrupteurs (à droite (sortie) et à gauche (entrée)) pour permettre aux deux sources PV et batterie d'alimenter parallèlement la charge.

2.2 Régulation par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM en anglais)

La régulation par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM en anglais) est une technique utilisée dans les contrôleurs de charge pour gérer l'énergie provenant d'une source (comme des panneaux solaires) vers une batterie. Elle permet de charger la batterie de manière efficace tout en prolongeant sa durée de vie en évitant les surcharges. Le contrôle de la charge de la batterie consiste à insérer un convertisseur DC-DC à base d'interrupteur ultra-rapide qui ajuste le flux d'énergie en faisant varier le courant provenant du module PV.

2.2.1 Principe de fonctionnement de la commande MLI

Un régulateur PWM agit comme un interrupteur électronique rapide (Hacheur) placé entre la source PV et la batterie.

- **Contrôle du courant** : L'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe, mais la durée pendant laquelle il reste fermé (la largeur de l'impulsion) varie en fonction de l'état de charge de la batterie.
- **Réduction de l'énergie** : Lorsque la batterie approche de sa pleine charge, le régulateur réduit la largeur des impulsions, diminuant ainsi le courant moyen injecté pour éviter la surcharge.

La MLI génère un signal rectangulaire de période fixe où seule la durée de l'état "haut" (ON) change.

- **Rapport cyclique (D)** : C'est le ratio (rapport) entre le temps où l'interrupteur est fermé (Ton) et la période totale d'hachage ($T = 1 / f$ avec fréquence d'hachage).
- **Contrôle du courant** : En modifiant ce rapport (**D**), le régulateur ajuste la valeur moyenne du courant envoyé à la batterie. Plus la batterie se remplit, plus les impulsions deviennent courtes pour éviter la surcharge.

2.2.2 Etapes de charge d'une batterie avec PWM

Le processus de charge se décompose généralement en trois phases principales pour préserver la durée de vie de la batterie :

- a. **Phase Bulk (Charge de masse) :**
 - L'interrupteur reste fermé en continu ($D = 1 = 100 \%$).
 - Le courant maximal disponible du panneau est envoyé pour remonter rapidement la tension de la batterie.
- b. **Phase Absorption (Régulation PWM) :**
 - Lorsque la tension atteint son seuil de sécurité, le régulateur commence à commuter rapidement (PWM).
 - Le rapport cyclique diminue progressivement ($D < 1$) pour maintenir une tension constante tout en réduisant le courant provenant du panneau et injecté dans la batterie à mesure que la batterie sature.
- c. **Phase Float (Maintien) :**
 - Une fois chargée à 100 %, le régulateur envoie de très courtes impulsions (faible rapport cyclique $D \lll 1 \rightarrow D \approx 0$).
 - Cela compense l'autodécharge naturelle de la batterie sans provoquer de gazage ou de surchauffe.

2.2.3. Avantages et Limites

- **Avantages :** Solution simple, robuste et économique, idéale pour les petits systèmes (moins de 150W).
- **Limites :** Contrairement au [régulateur MPPT](#), le PWM force les panneaux solaires à travailler à la tension de la batterie, ce qui entraîne une perte d'efficacité d'environ 20 à 30 %.

2.3 Régulation par maximum power point tracking (MPPT)

Dans ce cas, le hacheur et contrôler pour extraire le maximum de puissance électrique du module PV en imposant une tension V_{pv} entre ses bornes correspondant à la puissance électrique P_{pv} maximale pour différentes conditions climatiques. La commande de la tension du module V_{pv} est réalisée par voie du rapport cyclique (D) de l'hacheur.

Le régulateur MPPT est indispensable si :

- **Puissance > 200W :** Dès que l'installation devient conséquente, le gain de rendement amortit rapidement le surcoût de l'appareil.
- **Tension panneau élevée :** Si vous utilisez des panneaux "maison" (30V, 60V) pour charger des batteries 12V/24V, le MPPT est obligatoire pour ne pas gaspiller l'énergie.
- **Conditions variables :** Par temps couvert ou froid, le MPPT ajuste en permanence son algorithme pour tirer le maximum du panneau.
- **Câblage :** Il permet de mettre plusieurs panneaux en série, ce qui réduit l'intensité du courant et permet d'utiliser des câbles plus fins (moins chers).