

ENSICAEN FISE - FISA

Hacheur

2A GeNE

M.D., D.B.
24/07/2025

Table des matières

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....	2
Électrolyseur et panneau solaire.....	3
1. Électrolyseur.....	3
2. Panneau solaire	4
3. Association panneau photovoltaïque – électrolyseur.....	5
Convertisseur DC-DC hacheur.....	6
1. Étude en simulation du convertisseur DC-DC hacheur buck.....	6
Convertisseur DC-DC hacheur pour l'association PV - électrolyseur	9
1. Simulation convertisseur DC-DC hacheur.....	9
2. Expérimental – hacheur buck.....	10

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Parmi les solutions de substitution aux énergies fossiles, l'hydrogène est un vecteur énergétique propre et durable lorsqu'il est produit à partir de l'énergie solaire. Utilisé par une pile à combustible, cet « hydrogène vert » est de plus en plus utilisé dans les transports (trains, voiture, bus, navires, ...) dans un contexte où la réduction des émissions de CO₂ est un enjeu majeur.



Figure 1 : bus à hydrogène de la flotte de transport en commun de l'agglomération de la Roche-sur-Yon

L'objectif est ici d'illustrer le principe et la mise en œuvre de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire et de souligner l'importance de l'électronique de puissance pour augmenter le rendement de production d'hydrogène. Dans le système considéré, l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau par un électrolyseur « Hydro-Genius™ ». Le kit pédagogique associe un panneau solaire à un électrolyseur comme illustré en figure 9, il permet l'étude et la mise en œuvre d'une chaîne de conversion d'énergie avec, pour source primaire, l'énergie solaire convertie par un panneau photovoltaïque. Les électrolyseurs sont de technologie à membrane échangeuse de protons et le panneau photovoltaïque est de technologie monocristalline. Un convertisseur d'énergie DC-DC à découpage (Buck synchrone) est associé aux éléments du kit pédagogique pour une exploitation optimale de la ressource solaire.

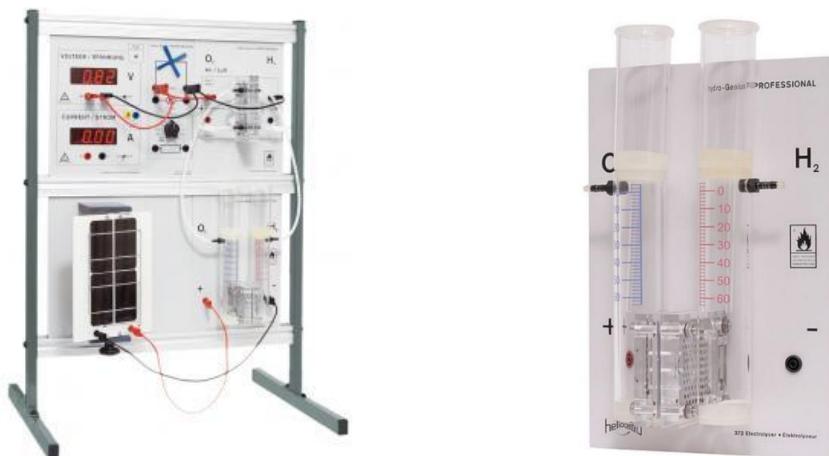


Figure 1 : (à gauche) kit pile à combustible panneau solaire. (à droite) électrolyseur.

Contexte : optimisation de la production d'un électrolyseur associé à un panneau solaire.

Électrolyseur et panneau solaire

Objectifs : modélisation électrique de l'électrolyseur et du panneau solaire, évaluation de la puissance exploitable.

1. Électrolyseur

Le modèle électrique de l'électrolyseur est présenté en figure 2, il est composé d'une source de tension et d'une résistance en série. La source de tension modélise la force électromotrice nécessaire pour initier et maintenir la réaction d'électrolyse. La résistance modélise les pertes à travers l'électrolyte et les interfaces (contacts électriques, membranes, ...).

La figure 3 issue de la caractérisation de l'électrolyseur (fichier **caracterisation_electrolyseur.xlsx**) représente la réponse tension-courant de l'électrolyseur.

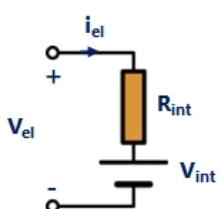


Figure 2 : modèle électrique équivalent de l'électrolyseur.

Données numériques :

Énergie volumique de l'hydrogène (H_2), à la pression atmosphérique : 10.91 kJ/l.

Courant max. dans l'électrolyseur : 2 A

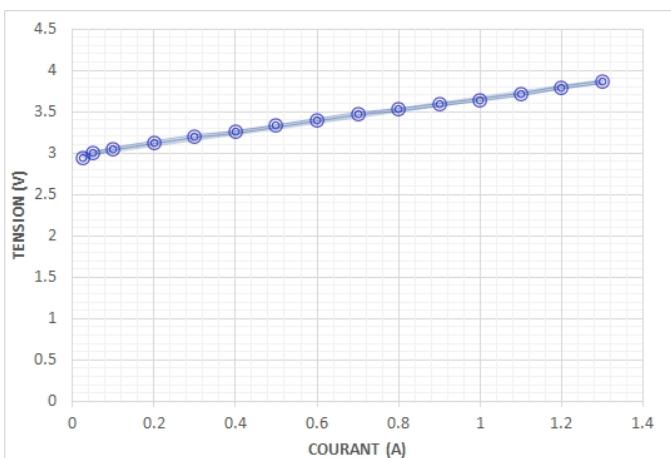


Figure 3 : courbe tension-courant de l'électrolyseur.

Encart production d'hydrogène

La quantité d'hydrogène produite est régie par la loi de Faraday, qui relie la masse de gaz produit au courant électrique et au temps d'électrolyse :

$$m = \left(\frac{M}{nF} \right) I \cdot t$$

Avec :

- m : masse d'hydrogène produite (en kg).
- M : masse molaire de l'hydrogène (2 g/mol pour H_2).
- n : nombre d'électrons échangés par molécule (2 pour H_2).
- F : constante de Faraday (96 485 C/mol).
- I : courant (en ampères).
- t : temps (en secondes).

Question : combien d'hydrogène est produit par un courant de 1 A pendant 1 heure ?

Activité 1 Modèle de l'électrolyseur

À partir des données de mesure de la figure 3 **proposer** des valeurs numériques pour le modèle électrique de l'électrolyseur.

La puissance utile pour la génération d'hydrogène (réaction d'électrolyse) correspond au produit du courant entrant dans l'électrolyseur, i_{el} , par la différence de potentiel interne V_{int} (voir figure 2).

$$P_{utile} = V_{int} \cdot i_{el}$$

Les pertes correspondent aux pertes par effet Joule dans la résistance série, R_{int} , de l'électrolyseur.

Activité 2 Rendement de l'électrolyseur

À partir du modèle électrique de l'électrolyseur, **tracer** l'évolution théorique du rendement en énergie de la conversion électrochimique en fonction du courant (dans le cas d'une électrolyse à courant constant).

2. Panneau solaire

Le modèle électrique du panneau solaire est représenté en figure 4.

La source de courant représente le courant généré par la cellule photovoltaïque sous l'effet de la lumière. Ce courant dépend de l'intensité lumineuse et des caractéristiques du matériau.

La diode modélise la jonction PN de la cellule solaire. Elle représente l'effet de recombinaison des électrons et limite la tension maximale que le panneau peut fournir. La résistance parallèle (R_{sh} , shunt) modélise les pertes par fuites à travers la jonction du semi-conducteur. Une faible résistance de shunt signifie des pertes plus importantes, ce qui réduit l'efficacité. La résistance série (R_s) représente la résistance interne des connexions et du matériau semi-conducteur. Une résistance série élevée réduit le courant délivré et donc la puissance du panneau.

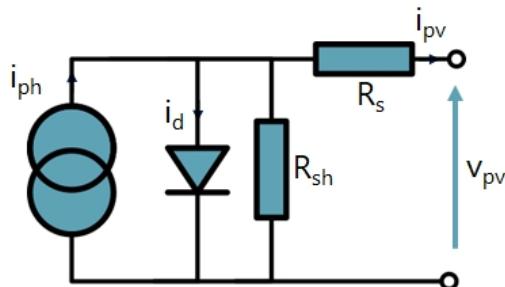


Figure 4 : modèle électrique du panneau solaire.

La figure 5 représente la caractéristique courant-tension du panneau solaire (fichier **caractérisation_PV.xlsx**).

Activité 3 Point de fonctionnement de fonctionnement optimal

Tracer la caractéristique puissance-tension du panneau solaire.

Identifier le point de fonctionnement optimum.

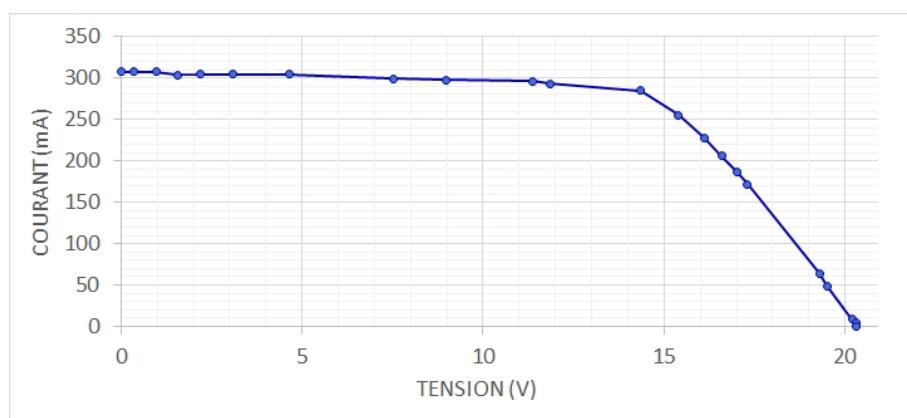


Figure 5 : caractéristique courant-tension du panneau solaire.

Question : sur quelle grandeur électrique agirait une intensité lumineuse plus élevée ?

3. Association panneau photovoltaïque – électrolyseur

Activité 4

Point de fonctionnement de l'association PV et électrolyseur

Tracer sur la même figure les caractéristiques du panneau solaire PV et de l'électrolyseur.

Au point de fonctionnement de l'association PV – électrolyseur **évaluer** la puissance électrique produite.

En **déduire** l'intérêt d'utiliser un convertisseur d'électronique de puissance DC-DC de type Buck (hacheur abaisseur).

Convertisseur DC-DC hacheur

Objectifs : découvrir une des principales structures de hacheur rencontrée dans le domaine de l'électronique de puissance : le hacheur série (convertisseur buck). Modélisation et caractérisation d'un convertisseur DC-DC de type hacheur, évaluation de la production d'hydrogène.

1. Étude en simulation du convertisseur DC-DC hacheur buck

Cette partie porte sur une étude générale du fonctionnement des convertisseurs DC-DC de type hacheur buck, en s'appuyant sur des simulations.

Les simulations utilisent le logiciel LTSpice. Le fichier **tp_hacheur_base.asc** correspond à une structure simple de hacheur buck, illustrée en figure 6.

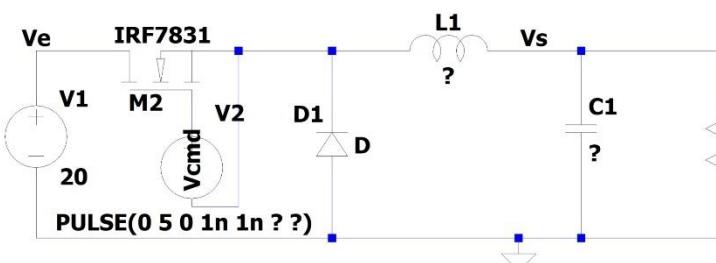


Figure 6 : schéma de la structure de base d'un hacheur buck.

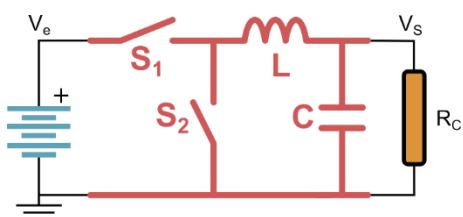


Figure 7 : schéma électrique simplifié d'un convertisseur type hacheur Buck.

Activité 1

Simulation : évolution tension sortie en fonction du rapport cyclique

Ajuster les paramètres de simulation et du schéma pour **relever** la valeur de la tension de sortie Vs en fonction du rapport cyclique.

Conditions de simulation :

$C1 : 470 \mu F, R1 : 10 \Omega, L1 : 300 \mu H, fréquence PWM 50 kHz$

Question : le hacheur série buck est-il abaisseur ou élévateur de tension ?

Activité 2

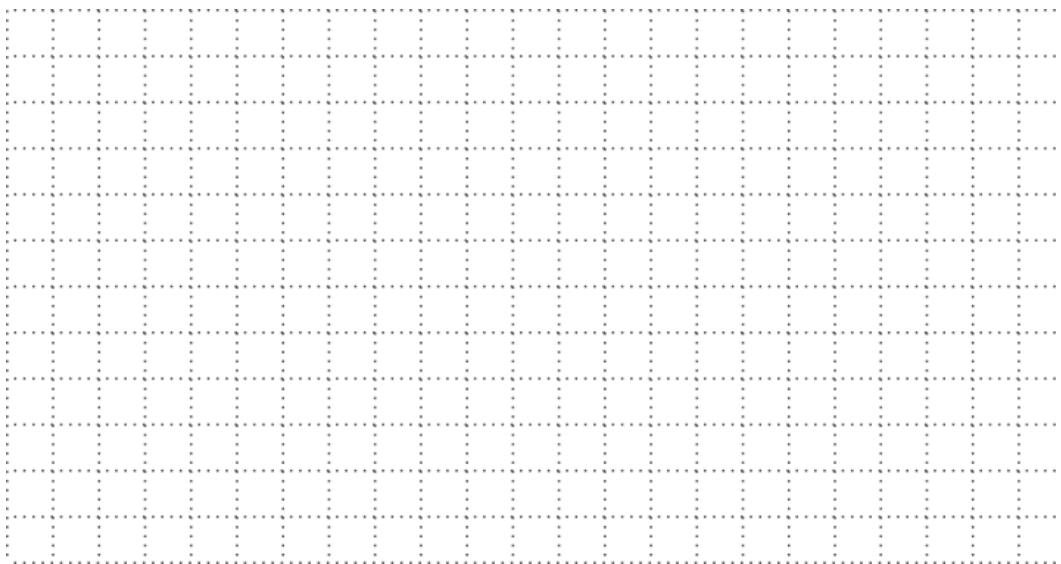
Expression valeur moyenne de la tension de sortie

Exprimer la valeur moyenne de la tension de sortie Vs en fonction de Ve et du rapport cyclique α .

Activité 3

Observation et analyse des formes d'ondes en simulation

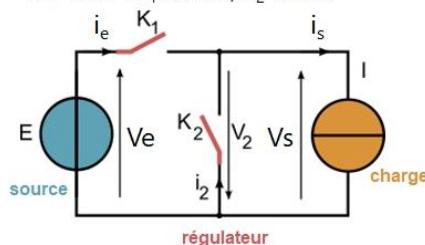
Relever les formes d'ondes tension et courant.



- Principe : transfert d'énergie de la source vers la charge en utilisant les interrupteurs K_1 et K_2 . K_1 et K_2 pas simultanément ouverts ou fermés.

$0 < t < \alpha T$: K_1 fermé, K_2 ouvert

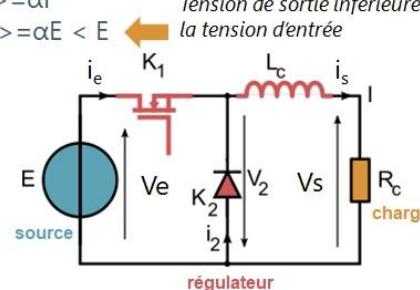
$\alpha T < t < T$: K_1 ouvert, K_2 fermé



$$\langle v_e \rangle = \alpha I$$

$$\langle v_s \rangle = \alpha E < E$$

Tension de sortie inférieure à la tension d'entrée



$$P_E = \langle v_e i_e \rangle = V_e \langle i_e \rangle = \alpha V_e I ; P_c = \langle v_s i_s \rangle = V_s \langle i_s \rangle = \alpha V_e I$$

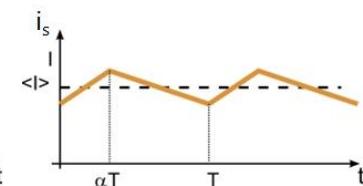
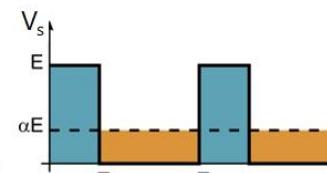
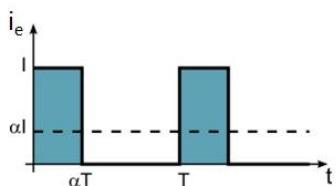


Figure 8 : rappel principe de fonctionnement hacheur buck.

Activité 4

Effet de la charge

Simuler le montage pour différentes valeurs de charge. **Observer** les courants dans la charge et au niveau de la source. **Commenter**.

Activité 5

Inductance de lissage

Observer l'ondulation du courant de sortie selon la valeur de l'inductance de lissage.

Question : quel critère dimensionne la valeur de l'inductance ?

L'inductance est choisie en fonction de la tension d'entrée, de la tension de sortie, de la fréquence de commutation et de l'ondulation de courant (*ripple*) souhaitées.

$$L = \frac{(V_e - V_s) \cdot V_s}{\Delta I_L \cdot f \cdot V_e}$$

où ΔI_L est l'ondulation de courant dans l'inductance et f est la fréquence de commutation. Dans la pratique, l'inductance est dimensionnée pour limiter l'ondulation de courant à environ 20-40% du courant de sortie maximal.

Activité 6 (optionnelle)	<u>Expression de l'ondulation de courant</u> En supposant la tension de sortie constante, retrouver l'expression de l'ondulation de courant dans l'inductance.
-----------------------------	--

Dimensionnement de la capacité de sortie

Activité 7	<u>Condensateur de lissage</u> Observer l'ondulation de la tension de sortie en fonction de la capacité de sortie.
------------	--

La capacité de sortie est choisie pour limiter l'ondulation de la tension à la sortie (hypothèse forme de courant triangulaire).

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_s}$$

Avec ΔV_s l'ondulation de la tension de sortie.

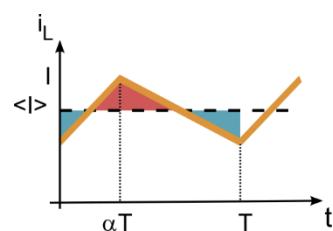
L'ondulation de tension, ΔV_s , aux bornes du condensateur est liée à la charge et à la décharge du condensateur par le courant. Pour une onde triangulaire, la variation de charge, ΔQ , est :

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V_s$$

La variation de charge est aussi égale à l'aire sous la courbe du courant pendant une demi-période de commutation ($T/2$) :

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T}{2} = \frac{\Delta I_L \cdot T}{8}$$

Avec la période $T = \frac{1}{f}$



Activité 5	<u>Fonctionnement discontinu</u> Réduire la fréquence du signal de commande PWM en dessous du kiloHertz. Observer les formes d'onde des tension et courant de sortie.
------------	---

Convertisseur DC-DC hacheur pour l'association PV - électrolyseur

Objectifs : analyser une structure avancée de convertisseur appliquée à l'optimisation de l'association panneau solaire et électrolyseur.

La connexion directe du panneau solaire à l'électrolyseur n'est pas optimale en termes de production d'hydrogène. Cette section comporte deux parties la première concerne la simulation du convertisseur dédié à l'association panneau solaire et électrolyseur, la seconde concerne les mesures autour de la maquette hacheur.

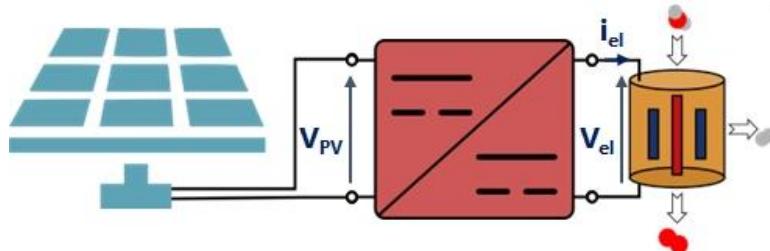


Figure 9 : schéma bloc de l'association du panneau solaire à l'électrolyseur à travers un convertisseur DC-DC de type hacheur.

1. Simulation convertisseur DC-DC hacheur

Activité 1

Calcul rapport cyclique optimal convertisseur DC-DC

À partir des caractéristiques du panneau solaire et de l'électrolyseur, **calculer** la valeur optimale théorique du rapport cyclique permettant d'exploiter au mieux la ressource solaire.

Le fichier LTspice **tp_hacheur_hydrogène.asc** est disponible sur l'espace Moodle.

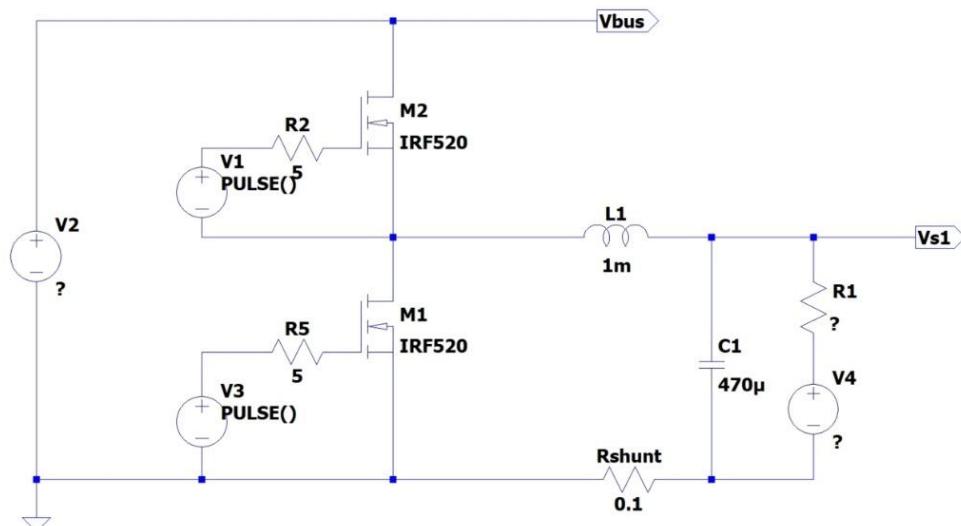


Figure 10 : schéma du convertisseur DC-DC entre les panneaux solaires et l'électrolyseur.

Activité 2 Simulation du convertisseur DC-DC

Identifier la structure du hacheur et ses différents éléments. **Compléter** le fichier LTspice pour simuler les conditions de rapport cyclique optimal.

Question : quel est le rôle de la résistance R_{shunt} ? Expliquer le choix de sa valeur.

Question : quels composants sont utilisés pour les interrupteurs S_1 et S_2 ? Quelles alternatives existent ?

2. Expérimental – hacheur buck

Le schéma électrique de la maquette hacheur est disponible sur la plateforme Moodle dans les ressources du TP.

Activité 1 **Identifier** les fonctions présentes dans la maquette hacheur.

Question : quelle fonction est réalisée par le composant IR2104 ?

Question : quel montage et quelle fonction sont réalisés autour de l'amplificateur TL081 ?

Question : quel montage et quelle fonction sont réalisés autour du composant LM311 ? De quel type de composant s'agit-il ?

La figure 11 présente une photographie de la maquette avec les principaux connecteurs.

Activité 2 **Mettre en œuvre** le montage avec une charge résistive et **visualiser** les formes d'ondes pour différents rapports cycliques.

Activité 3 **Évaluer** le rendement du hacheur dans le cas d'usage actuel.

Question : d'où proviennent les pertes dans le montage hacheur ?

Question : quelles contraintes conduisent au choix de la fréquence de la commande PWM ?

Activité 4 Étude de l'effet de la fréquence sur l'efficacité

(optionnelle) **Étudier** l'effet de la fréquence sur le rendement du convertisseur.

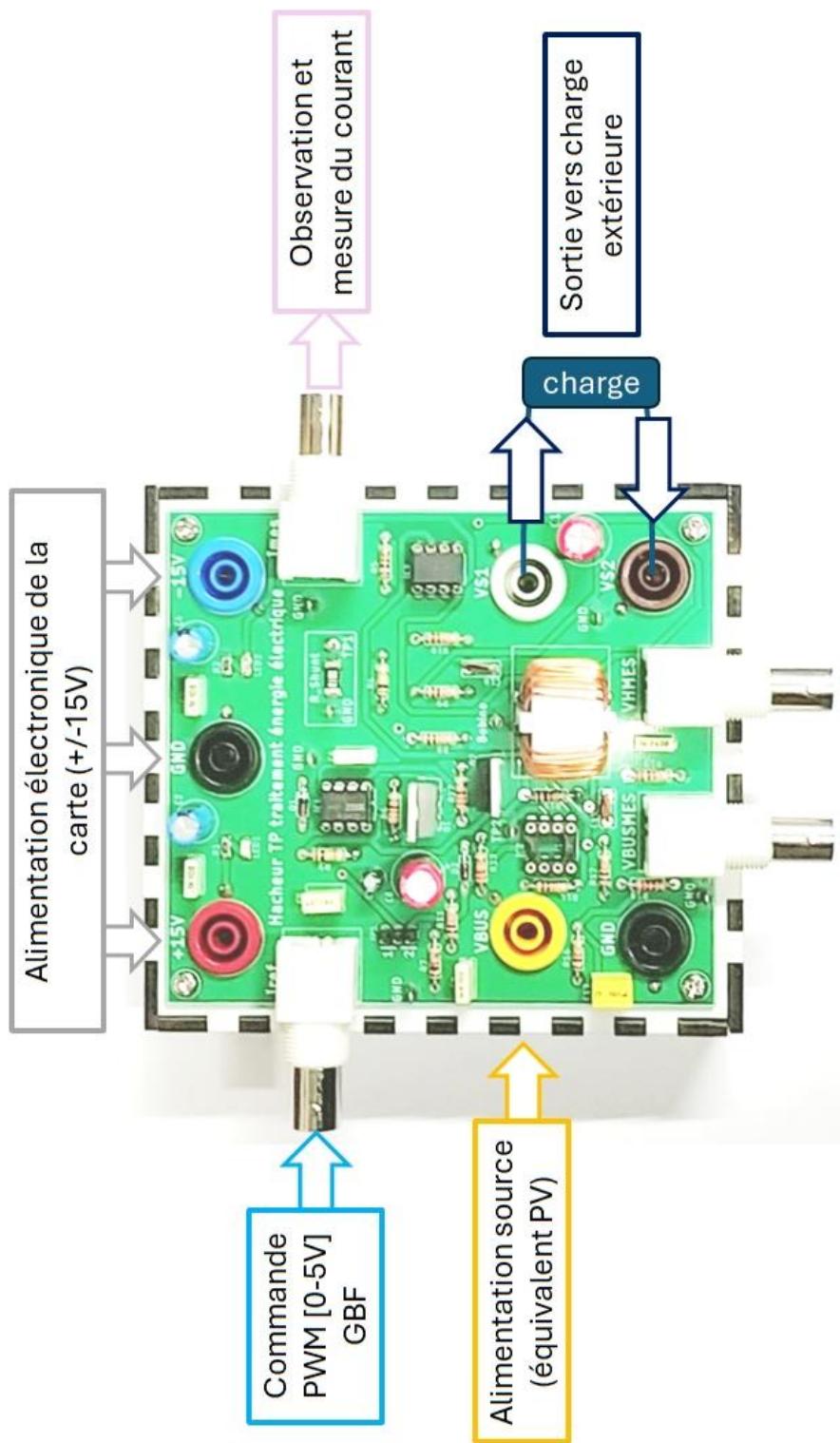


Figure 11 : connectique carte hacheur.