



HAL
open science

'électrolyse de l'eau et de l'énergie solaire photovoltaïque pour l'électrification rurale à Madagascar

Dolly Armël Sylvain Andriatoavina, Ali Hamada Fakra, Adolphe Andriamanga
Ratiarison, José Marie Michel Andriamampianina

► To cite this version:

Dolly Armël Sylvain Andriatoavina, Ali Hamada Fakra, Adolphe Andriamanga Ratiarison, José Marie Michel Andriamampianina. 'électrolyse de l'eau et de l'énergie solaire photovoltaïque pour l'électrification rurale à Madagascar. *Afrique Science : revue internationale des sciences et technologies*, 2021, 18 (1), pp.133-147. <hal-03608621>

HAL Id: hal-03608621

<https://hal.science/hal-03608621v1>

Submitted on 24 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Potentiel de l'hybridation de la gazéification de la biomasse, de l'électrolyse de l'eau et de l'énergie solaire photovoltaïque pour l'électrification rurale à Madagascar

Dolly Armël Sylvain ANDRIATOAVINA^{1,2*}, Damien FAKRA³, Adolphe Andriamanga RATIARISON¹ et José Marie Michel ANDRIAMAMPINANINA^{1,2}

¹ *Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences, Laboratoire de Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (DyACO), BP 566 Antananarivo 101, Madagascar*

² *Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo (IST-T), École du Génie Industriel, BP 8122 Antananarivo 101, Madagascar*

³ *Université de La Réunion, Département Sciences du Bâtiment et de l'Environnement (SBE), Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Énergie, l'Environnement et le Bâtiment (PIMENT), BP 7151 La Réunion, France*

* Correspondance, courriel : andriatoavinadolly@gmail.com

Résumé

Les travaux de recherche ont pour objectif l'amélioration des performances d'une centrale électrique à biomasse, en intégrant un système de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le système est composé d'électrolyseurs alimentés par des panneaux solaires photovoltaïques, un gazogène à lit fixe co-courant et un groupe électrogène. Afin d'augmenter l'autonomie de cette centrale, l'hydrogène, produit par l'électrolyse de l'eau, est mélangé avec du syngaz obtenu par gazéification de la biomasse. Les conditions météorologiques du site d'implantation de la centrale électrique et les caractéristiques de la balle de riz de Madagascar sont les données de simulation des productions d'hydrogène et de syngaz. Par rapport à l'alimentation de la centrale en syngaz pur, et en prenant comme hypothèse un stock initial de 60 Nm³ de syngaz en vue de délivrer une puissance de 5 kW d'électricité, l'ajout d'hydrogène dans le syngaz permet d'augmenter deux heures d'autonomie avec 150 modules panneaux-électrolyseurs, et six heures avec 250 modules. Ainsi, l'hybridation de la gazéification, de l'électrolyse et de l'énergie solaire photovoltaïque apporte des améliorations à la production d'électricité. Le système d'alimentation proposé contribue à l'indépendance énergétique des zones isolées du réseau électrique national, et à l'amélioration du niveau de vie de la population rurale à Madagascar.

Mots-clés : *hybride, gazéification, photovoltaïque, électrolyse, électrification rurale.*

Abstract

Potential of biomass gasification, water electrolysis and photovoltaic hybridization for rural electrification in Madagascar

The objective of this study is to improve the performance of biomass power plants by integrating a hydrogen production system through water electrolysis. The system studied consists of electrolyzers fueled by

photovoltaic solar panels, a co-current fixed bed gasifier, and a generator. The hydrogen produced by the solar electrolysis of water is mixed with the syngas produced by the gasification of biomass to increase the autonomy of the generator. Meteorological data from the Anjiajia site as well as the characteristics of the rice husk from Madagascar are used to simulate the production of hydrogen and syngas. For the PV-electrolyzer coupling, simulations show that the conversion of solar radiation into hydrogen is optimal when one PV fuels 12 electrolyzer cells in series. Compared to the use of pure syngas, adding hydrogen in the syngas provides two more hours of autonomy with 150 modules and six more hours of autonomy with 250 modules when producing 5 kW electrical power with a start reserve of 60 Nm³. This study demonstrates the improvements brought by the hybridization of gasification, electrolysis, and photovoltaic solar energy for electricity production. Therefore, it contributes to the development of rural communities isolated from the grid by improving their energy independence.

Keywords : *hybrid, gasification, photovoltaic, electrolysis, rural electrification.*

1. Introduction

L'indépendance énergétique est une condition d'importance capitale pour tout pays ayant comme objectif le développement durable [1]. Que ce soient pour les pays développés qui souhaitent substituer le pétrole, que pour les pays en développement qui veulent améliorer leur taux d'électrification, les solutions les plus attrayantes s'orientent toutes vers les énergies renouvelables [2]. En effet, produites localement et en quantité inépuisable à l'échelle humaine, les énergies renouvelables permettent à la fois une production plus propre avec peu ou pas d'émission de dioxyde de carbone (CO₂), à des coûts d'exploitation moins élevés et plus stables, comparés à la volatilité du prix du pétrole [3]. Parmi les différents procédés de production d'électricité issus des énergies renouvelables, la gazéification de la biomasse et l'énergie solaire photovoltaïque ont une place prépondérante dans les projets d'électrification rurale [4]. La gazéification consiste à transformer la biomasse en un gaz combustible riche en dihydrogène et en monoxyde de carbone, grâce à un processus de combustion incomplète. Ce combustible appelé gaz de synthèse (ou syngaz) peut être utilisé pour alimenter un moteur thermique accouplé à un alternateur [5]. La gazéification a l'avantage d'apporter une solution à la fois au problème de gestion des déchets agricoles et au problème d'électrification rurale [6].

Cependant, suivant la nature et la disponibilité de la biomasse, la qualité et la quantité du syngaz produit peuvent fluctuer beaucoup [7], et ne permet pas de garantir l'approvisionnement en électricité des clients sur le long-terme. Par rapport à l'essence et le gazole, le syngaz a un pouvoir calorifique faible qui peut rendre sa combustion instable dans les moteurs des groupes électrogènes [7]. Par exemple, lorsque Szwaja et al. [8] ont alimenté un moteur à allumage commandé avec du syngaz issu de boue d'épuration, ils ont constaté une variation de plus de 5 % de la pression dans les cylindres du moteur. Les problèmes de puissance d'énergie et de disponibilité de la biomasse présentent donc les obstacles à surmonter pour améliorer les centrales électriques à biomasse dans les projets d'électrification rurale. Par rapport à la gazéification, la production d'électricité à partir des panneaux solaires photovoltaïques a l'avantage d'un fonctionnement qui ne nécessite pas de matières premières locales. La centrale photovoltaïque peut fournir de l'électricité sans dépendre d'aucune filière de production de combustible ou de biomasse [9]. Cependant, l'obstacle, qui peut freiner les projets d'électrification rurale par panneaux solaires photovoltaïques, reste le coût élevé des batteries de stockage [10]. On propose alors une solution qui consiste à transformer l'énergie solaire en dihydrogène, qui servira à enrichir directement le combustible du groupe électrogène [11]. Pour répondre aux problèmes liés

à l'autonomie des gazogènes, aux coûts des batteries de stockage dans les centrales solaires et au stockage de l'hydrogène dans les systèmes d'électrolyse de l'eau, on propose un système hybride constitué de panneaux solaires, d'électrolyseurs, d'un gazogène et d'un groupe électrogène. De ce fait, on souhaite améliorer l'autonomie de la centrale avec la même quantité de biomasses. La combustion sera aussi plus stable grâce à l'enrichissement du combustible en dihydrogène. L'objectif de cet article est de montrer l'amélioration apportée par l'ajout de dihydrogène dans le syngaz. L'indicateur de performance du système est le nombre d'heures d'autonomie. Un exemple d'application est présenté en prenant le cas d'une centrale électrique du village d'Anjajia à Madagascar.

2. Matériel et méthodes

2-1. Modélisation du système hybride PV-électrolyseur-gazogène-groupe électrogène

Comme illustré sur la *Figure 1*, le système étudié est composé de cinq sous-systèmes : les panneaux solaires, le générateur d'hydrogène composé d'électrolyseurs, le gazogène, le régulateur de débit, et le groupe électrogène comportant un moteur à combustion interne accouplé à un alternateur.

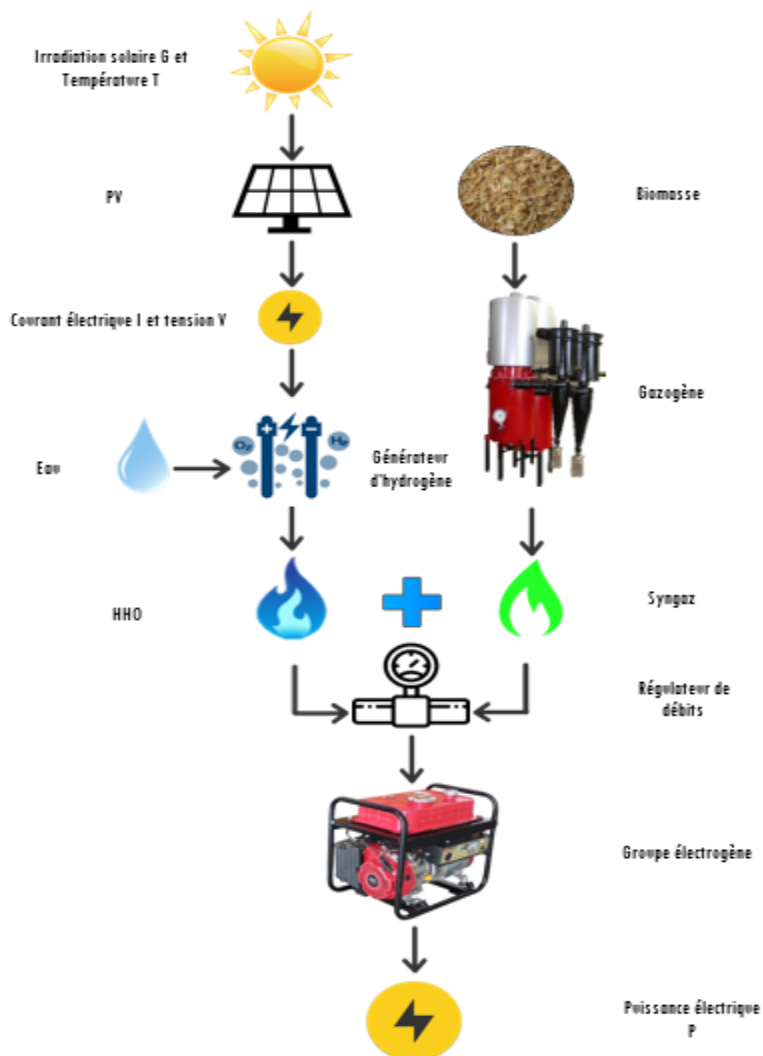


Figure 1 : *Système hybride PV - Générateur d'hydrogène - Gazogène - Groupe électrogène*

2-1-1. Modélisation des panneaux solaires photovoltaïques

Le modèle de calcul proposé par Benghanem et Alamri [17] est utilisé pour représenter la production d'électricité par les panneaux solaires photovoltaïques. Ce modèle explicite a l'avantage d'être simple, car on n'utilise que quatre paramètres de conception issus des constructeurs : l'intensité en court-circuit I_{SC} , la tension en circuit ouvert V_{OC} , l'intensité correspondant au point de puissance maximale I_m et la tension de puissance maximale V_m . Cela suffit pour avoir une bonne estimation de l'intensité et de la tension aux bornes des panneaux, car, comparée aux mesures expérimentales, l'erreur quadratique moyenne du modèle est de 3,9 % pour une irradiation de 1000 W/m² et une température de 25°C [17]. Suivant le modèle explicite, l'expression caractéristique reliant l'intensité et la tension des panneaux est donnée par *l'Équation 1*, où C_1 et C_2 sont des coefficients donnés respectivement par *l'Équation 2* et *l'Équation 3* [17].

$$I = I_{SC} \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{OC}} \right) - 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \exp \left(- \frac{V_m}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m - 1}{V_{OC}}}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right)} \quad (3)$$

Les quatre paramètres de conception $I_{SC_{ref}}$, $V_{OC_{ref}}$, $I_{m_{ref}}$ et $V_{m_{ref}}$ issus des constructeurs se réfèrent à l'irradiation $G_{ref} = 1000$ W/m² et la température $T_{ref} = 25$ °C. Pour d'autres valeurs d'irradiation G et de température T , ces paramètres sont calculés à l'aide des *Équations 4 à 7* [18].

$$I_{SC} = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) I_{SC_{ref}} + \alpha \Delta T \quad (4)$$

$$V_{OC} = V_{OC_{ref}} + \left(\frac{kT}{q} \right) \log \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \beta \Delta T \quad (5)$$

$$I_m = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) I_{m_{ref}} + \alpha \Delta T \quad (6)$$

$$V_m = V_{m_{ref}} + \left(\frac{kT}{q} \right) \log \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \beta \Delta T \quad (7)$$

avec, ΔT : différence entre la température des panneaux T et la température de référence T_{ref} ; α : coefficient de variation du courant suivant la température ; β : coefficient de variation de la tension suivant la température ; k : constante de Boltzmann ; q : charge d'un électron.

2-1-2. Modélisation de l'électrolyseur

La décomposition de l'eau en dihydrogène et dioxygène dans une cellule d'électrolyse nécessite un flux d'électrons d'un générateur électrique extérieur. D'après la loi de Faraday de *l'Équation 8*, la quantité d'hydrogène m_{H_2} formée à la cathode est proportionnelle à l'intensité du courant I traversant l'électrolyseur [19 - 22].

$$m_{H_2} = \frac{M Q}{Z F r} = \frac{M I t}{Z F r} \quad (8)$$

où, m_{H_2} : masse d'hydrogène formée à la cathode ; M : masse molaire de l'hydrogène ; $Z = 2$: nombres d'électrons nécessaires pour produire une molécule de H_2 ; I : intensité du courant traversant la cellule d'électrolyse ; t : temps de fonctionnement de l'électrolyseur ; Q : charge en Coulomb ; Fr : constante de Faraday.

La caractéristique (I-V) de l'électrolyseur est donnée par l'Équation 9. Ce modèle, proposé par [23], permet de déterminer l'intensité I qui traverse l'électrolyseur en fonction de la tension V appliquée à ses bornes, de la température T de l'électrolyte et de la surface A des électrodes.

$$V = V_{rev} + \frac{r_1+r_2 T}{A} I + s \log \left(\frac{t_1+t_2/T+t_3/T^2}{A} I + 1 \right) \quad (9)$$

avec, V_{rev} : tension réversible de la cellule ; s, t_1, t_2, t_3 : coefficients de surtension des électrodes ; r_1, r_2 : paramètres liés à la résistance ohmique de l'électrolyte.

2-1-3. Modélisation du gazogène

Le gazogène est un réacteur, qui permet la transformation d'une biomasse, de composition chimique et de densité apparente connues, en un gaz combustible appelé syngaz. Pour pouvoir déterminer le pouvoir calorifique du syngaz, il est nécessaire de connaître la quantité de chaque élément qui la compose. Le calcul de la propriété et de la quantité de syngaz dans cet article est effectué à l'aide d'un outil nommé SIZER, développé par le Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion pour optimiser le dimensionnement des mini-gazogènes [24, 25]. Le gazogène considéré est du type co-courant à lit fixe, qui est le plus adapté aux projets d'électrification rurale en raison du faible quantité de goudron contenu dans le syngaz obtenu [26]. La fraction molaire $f mol_i$ de chaque composition i du syngaz est donnée par l'Équation 10 [24, 25].

$$f mol_i = \frac{k_i f mol_C^{rea}}{(k_{H_2} + k_{CO} + k_{CO_2} + k_{CH_4}) (f mol_C^{rea} + mol_{N_2}^{pro} + mol_{H_2O}^{pro})} \quad (10)$$

où, k_i : proportion de l'élément i produite sur le total de composés de carbone ($k_{CO} + k_{CO_2} + k_{CH_4} = 1$) ; $f mol_C^{rea}$: fraction molaire de carbone dans la biomasse ; $mol_{N_2}^{pro}$: nombre de moles de diazote dans le syngaz par mole de biomasse ; $mol_{H_2O}^{pro}$: nombre de moles d'eau dans le syngaz par mole de biomasse.

Le pouvoir calorifique inférieur PCI_{syn} du syngaz est alors évalué suivant la proportion des gaz combustibles qu'il contient, comme on peut constater dans l'Équation 11 [24, 25].

$$PCI_{syn} = \sum_i PCI_i f vol_i \quad (11)$$

avec, PCI_i : pouvoir calorifique inférieur de l'élément combustible i (H_2, CO, CH_4) ; $f vol_i$: fraction volumique de l'élément combustible i .

2-1-4. Modélisation du moteur à combustion interne

Le dihydrogène produit par les électrolyseurs et le syngaz fourni par le gazogène sont mélangés pour alimenter un moteur à combustion interne, accouplé à un alternateur. La puissance électrique P produit par le groupe électrogène peut alors être calculée suivant le débit deb_i et le pouvoir calorifique PCI_i de chaque gaz à l'aide de l'Équation 12. Le rendement η prend en compte à la fois le rendement du moteur et celui de l'alternateur [27].

$$P = \eta (deb_{syn} PCI_{syn} + deb_{H_2} PCI_{H_2}) \quad (12)$$

2-1-5. Modélisation du régulateur des débits de H₂ et de syngaz

Pour résoudre le problème de stockage lié à la volatilité et à l'inflammabilité du dihydrogène, il est proposé dans cet article d'injecter directement le dihydrogène produit avec le syngaz dans le moteur thermique. Le débit du dihydrogène produit fluctue dans le temps en fonction de l'irradiation solaire ; celui du syngaz est donc régulé pour que le mélange puisse fournir une puissance constante à l'alternateur. Le débit de gaz de synthèse à fournir au moteur est alors donné par *l'Équation 13* où P_n représente la puissance nominale de l'alternateur.

$$deb_{syn} = \left(\frac{P_n}{\eta} - deb_{H_2} PCI_{H_2} \right) / PCI_{syn} \quad (13)$$

La détermination des débits d'hydrogène et de syngaz à mélanger pour avoir une puissance constante à la sortie de l'alternateur comprend cinq étapes. Le débit d'hydrogène deb_{H_2} produit par le générateur à chaque heure de la journée-type est d'abord évalué à partir de *l'Équation 8*. Le débit de syngaz deb_{syn} nécessaire à mélanger avec le HHO pour avoir la puissance nominale P_n de l'alternateur est ensuite calculé à partir de *l'Équation 13*. La possibilité de produire ce débit de syngaz deb_{syn} est alors vérifiée suivant le volume de syngaz disponible. La puissance réelle P fournie par l'alternateur est ensuite calculée suivant les débits d'hydrogène produits et de syngaz disponible (*Équation 12*). Enfin, le volume de syngaz restant est évalué en fonction du débit soutiré.

2-2. Hypothèses de simulation

2-2-1. Conditions météorologiques

Le site d'implantation de la centrale électrique se trouve dans le village d'Anjiajia, situé à la latitude de -16,45 ° et à la longitude de 46,95 °. Les données météorologiques du site utilisées dans l'étude ont été récoltées à l'aide de l'outil PVGIS et s'étendent de 2005 à 2016. La *Figure 2* montre les évolutions dans le temps de la température T et de l'irradiation G du site au cours d'une journée-type représentative des 11 années d'enregistrement. Le soleil commence à produire suffisamment d'énergie pour alimenter les panneaux à partir de 7 h du matin pour une irradiation de 122,7 W/m². La journée d'ensoleillement se termine à 18 h avec une irradiation minimale de 34,69 W/m².

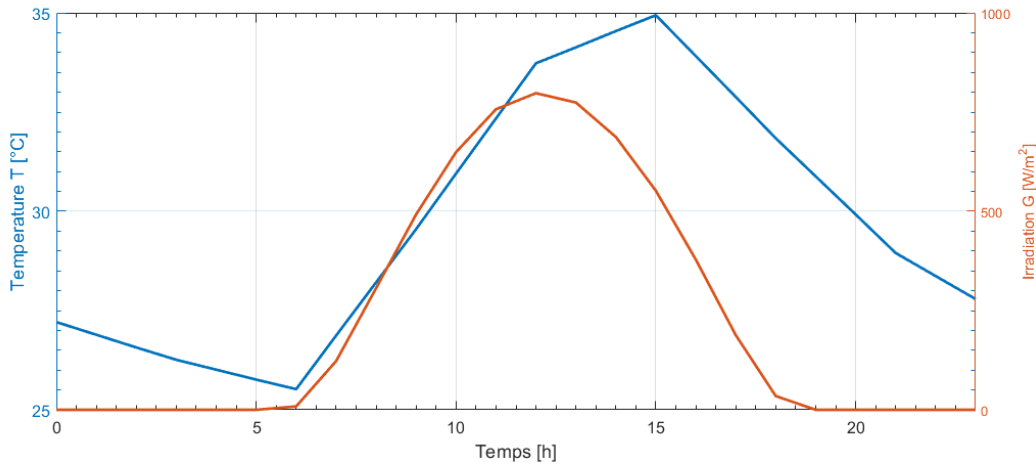


Figure 2 : Variations de l'irradiation et de la température au cours de la journée-type

2-2-2. Caractéristiques I-V des panneaux solaires et des électrolyseurs

Les caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques et des électrolyseurs sont présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Caractéristiques des panneaux solaires photovoltaïques et des électrolyseurs

PV [18]		Electrolyzers [23]	
Caractéristiques	Valeurs	Caractéristiques	Valeurs
I_m [A]	4,72	V_{rev} [V]	1,229
V_m [V]	18	A [m^2]	0,25
I_{sc} [A]	5	s [V]	0,185
V_{oc} [V]	22,03	t_1 [A/m^2]	1,002
α [$mA/^\circ C$]	3,2	t_2 [$A/m^2 \ ^\circ C$]	8,424
β [$mV/^\circ C$]	-80	t_3 [$A/m^2 \ ^\circ C^2$]	247.3
		r_1 [Ωm^2]	8,05e-5
		r_2 [$\Omega m^2 \ ^\circ C$]	-2,5 e-7

2-2-3. Caractéristiques de la balle de riz

La composition chimique du gaz de synthèse est intimement liée aux propriétés physico-chimiques de la biomasse. Dans cette étude, la biomasse alimentant le gazogène est la balle de riz de Madagascar, dont la composition massique et la masse volumique sont présentées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Caractéristiques de la balle de riz de Madagascar [28]

Propriétés	Valeurs
C % _m	33,86
H % _m	4,89
N % _m	0,94
O % _m	39,01
S % _m	0
ρ en kg/m^3	1390

3. Résultats et discussion

3-1. Optimisation du couplage panneau solaire-électrolyseurs

3-1-1. Conditions de couplage panneau solaire-électrolyseurs

Pour pouvoir alimenter les électrolyseurs à l'aide de panneaux solaires, il est nécessaire de remplir deux conditions [13, 18] :

- La tension aux bornes d'un panneau doit être la même que celle aux bornes d'un module de générateur d'hydrogène ;
- L'intensité du courant fournie par un panneau doit être la même que celle traversant un module de générateur d'hydrogène.

La détermination des points qui satisfont ces deux conditions de couplage est réalisée à partir des courbes des caractéristiques I-V des panneaux solaires et des électrolyseurs (*Figure 3*).

3-1-2. Problématique de l'optimisation « panneau solaire-électrolyseurs »

Pour soutirer du soleil le maximum d'énergie, il est recommandé de choisir des valeurs de tension et d'intensité correspondantes aux points de puissance maximale des panneaux [13]. Or, ces valeurs fluctuent temporellement suivant la variation de l'irradiation et la température (*Figure 2*). Il est donc nécessaire de déterminer le nombre optimal de cellules d'électrolyse à alimenter par un panneau solaire pour maximiser la production d'électricité durant la journée-type.

3-1-3. Nombre optimal de cellules d'électrolyse montées en série

La *Figure 3* montre les courbes caractéristiques I-V d'un panneau solaire et de plusieurs cellules d'électrolyse montées en série. Les courbes I-V du panneau solaire sont identifiées par l'heure de la journée type correspondante, tandis que les courbes des électrolyseurs sont identifiées par le nombre de cellules montées en série (N_s). Les points d'intersection de ces courbes montrent les points où les conditions de couplage du panneau et des électrolyseurs sont satisfaites. Quatre courbes I-V correspondantes à 11, 12, 13 et 14 cellules d'électrolyse montées en série sont présentées. Pour aider dans la détermination du nombre optimal N_s de cellules en série, les points de puissance maximale (MPP) du panneau à chaque heure de la journée-type sont aussi marqués. On constate que les intersections entre les courbes I-V avoisinent les points de puissance maximale pour deux nombres de cellules en série : $N_s = 12$ et $N_s = 13$. Mais les points correspondants à la plage horaire où le panneau produit le plus, c'est-à-dire de 10 h à 15 h, sont tous aux alentours de la courbe de $N_s = 12$. Ainsi, le nombre de cellules d'électrolyse en série retenue dans la suite de l'étude est égal à 12.

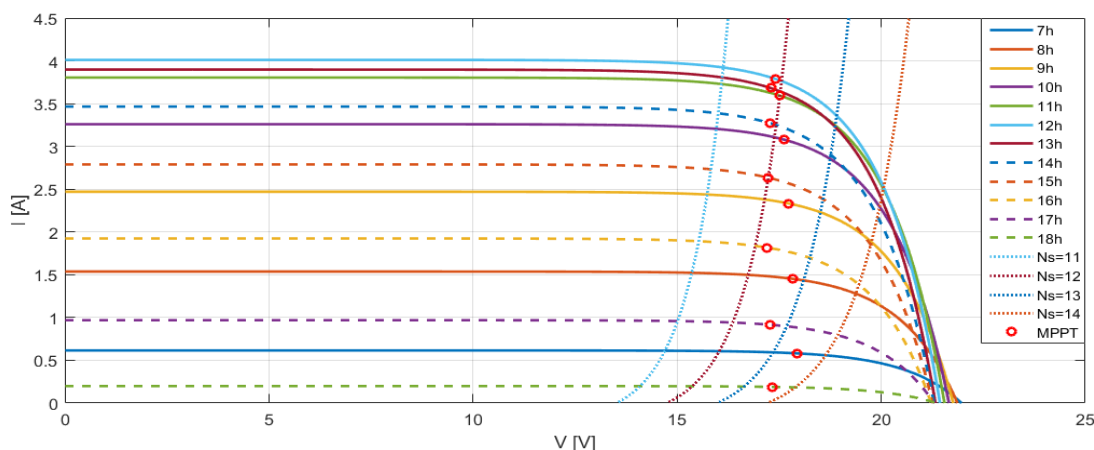


Figure 3 : Caractéristiques I-V du couple panneau solaire-électrolyseurs au cours de la journée-type

3-2. Production de dihydrogène et de syngaz au cours de la journée-type

3-2-1. Production de dihydrogène

L'étude du couplage panneaux-électrolyseurs permet d'estimer l'intensité du courant traversant les électrolyseurs à chaque heure de production de la journée-type. Ces valeurs sont ensuite introduites dans l'Équation 8 pour déterminer la quantité de dihydrogène produite par les 12 cellules d'électrolyse branchées à un panneau solaire. La Figure 4 montre l'évolution temporelle du débit volumique du dihydrogène au cours de la journée-type. On obtient un débit instantané maximal de 17,73 L/h à 12 h, et une production journalière de 131,58 L, soit une énergie équivalente à 1,42 MJ, qui est tout a fait significative pour un seul module de 12 cellules d'électrolyse alimenté par un panneau solaire. Si on divise cette quantité d'énergie par les 12 heures nécessaires pour les produire, la puissance fournie par une unité de « panneau solaire-électrolyseurs » peut donc être estimée à 32,87 W.

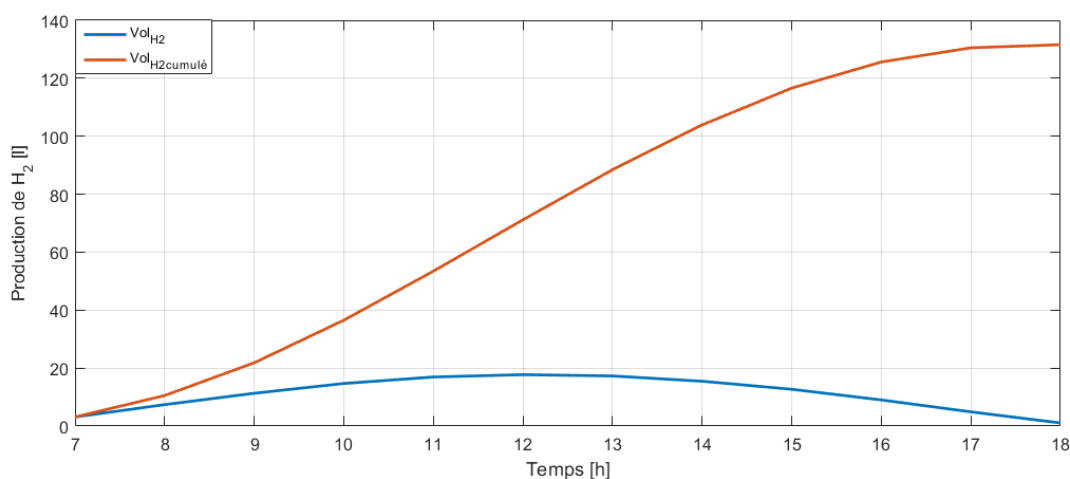


Figure 4 : Production de dihydrogène au cours de la journée-type

3-2-2. Production de syngaz : simulation sous SIZER

L'outil SIZER permet de calculer, suivant les caractéristiques de la biomasse, la composition du syngaz obtenu. Le Tableau 3 présente la composition volumique et le pouvoir calorifique inférieur du syngaz obtenu à partir de la balle de riz de Madagascar (Tableau 2). Ce syngaz est produit à l'aide d'un gazogène du type

co-courant à lit fixe. Il est ensuite mélangé avec le dihydrogène produit par les électrolyseurs pour alimenter le moteur thermique du groupe électrogène.

Tableau 3 : Propriétés du syngaz obtenu

Propriétés	Valeurs
H ₂ % _v	15,8
CO % _v	21,3
CH ₄ % _v	0,9
CO ₂ % _v	7,4
N ₂ % _v	35,1
H ₂ O % _v	19,7
PCI en MJ/Nm ³	4,685

3-3. Améliorations apportées à l'autonomie du système grâce à l'ajout de dihydrogène dans le syngaz

La contribution de l'enrichissement du syngaz par diffusion de dihydrogène est évaluée suivant la situation de référence ci-dessous. On suppose que la centrale a un stock initial de 60 Nm³ de syngaz provenant de balle de riz au début de la journée. Le syngaz a un pouvoir calorifique inférieur de 4,685 MJ/Nm³, et on suppose que ce stock diminue dans le temps en fonction de la quantité consommée pour alimenter un groupe électrogène de 5 kWe ayant un rendement global de 0,3.

3-3-1. Réduction de la consommation de syngaz par ajout de dihydrogène

La **Figure 5** montre l'évolution de la consommation des 60 Nm³ de syngaz durant la journée-type suivant le nombre d'unités PV-électrolyseurs (N) utilisées. Suivant le résultat obtenu par l'optimisation du couplage PV-électrolyseurs, un module PV-électrolyseurs est composé d'un PV, qui alimente 12 cellules d'électrolyse en série. D'après les résultats de la simulation sur la **Figure 5**, si on utilise le système traditionnel sans électrolyseur, les 60 Nm³ de syngaz arrivent à épuisement après 5 h d'utilisation, c'est-à-dire pour une production d'électricité de 7 h à 12 h. Avec l'ajout d'hydrogène, la pente des courbes de consommation de syngaz diminue et l'heure d'épuisement du stock recule de 1 h avec 100 modules PV-électrolyseurs (stock de syngaz épuisé à 13 h) et de 4 h avec 200 (stock de syngaz épuisé à 16 h). On constate aussi que l'allure de la courbe de consommation de syngaz varie avec le nombre de modules de PV-électrolyseurs utilisés : quand la proportion d'hydrogène ajoutée dans le mélange augmente, la courbe de la consommation devient non linéaire. Ceci vient du fait que l'utilisation de plus de modules PV-électrolyseurs rend le système plus dépendant de la production photovoltaïque, c'est-à-dire de la course du soleil. C'est pourquoi, avec 250 modules de PV-électrolyseurs, la deuxième partie de la courbe de consommation de syngaz a la même allure que la courbe de production de H₂ de la **Figure 4**.

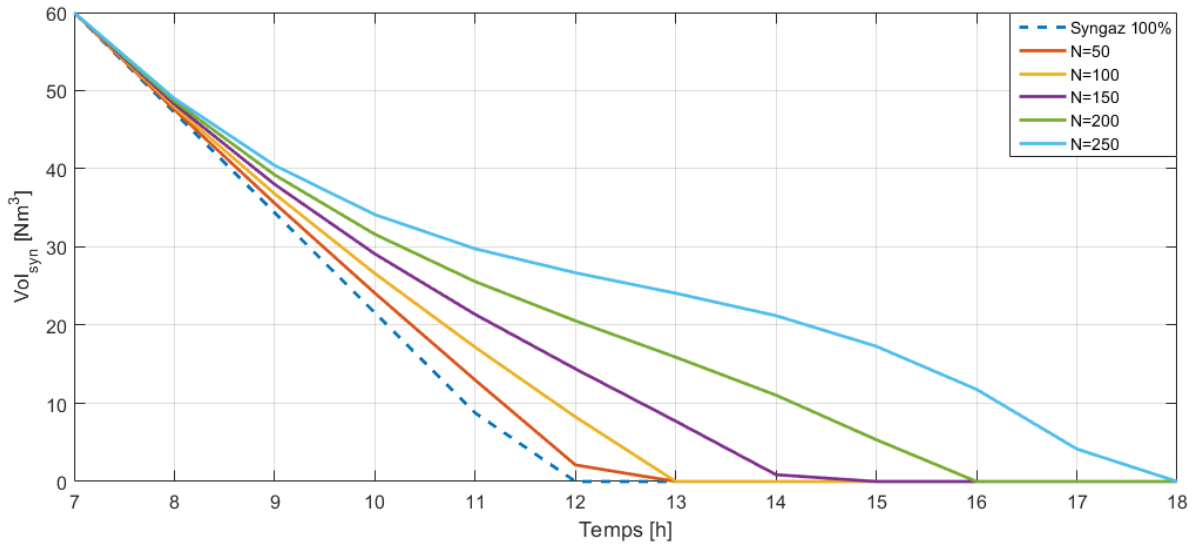


Figure 5 : Évolution de la consommation de syngaz au cours de la journée-type suivant le nombre de modules panneau-électrolyseurs utilisés

3-3-2. Amélioration de l'autonomie du système

Cependant, il est à remarquer que même si le stock de syngaz n'est pas encore totalement épuisé, cela ne répond pas forcément à la première exigence qualité de la production d'électricité, à savoir délivrer de manière continue la puissance demandée de 5 kW. En effet, comme on peut voir sur la **Figure 6**, la puissance délivrée par le groupe électrogène commence à décroître au moment où la quantité de syngaz et de dihydrogène n'est plus suffisante pour fournir les 5 kW. Durant l'épuisement de ce stock, l'allure de la courbe montrant la diminution de la puissance du moteur est la même que celle décrivant l'évolution de la production de dihydrogène de la **Figure 4**. Pendant ce temps, le groupe électrogène est alimenté seulement par du dihydrogène. Par rapport à la puissance demandée de 5 kW, l'autonomie du système est donc de 3 h avec le syngaz pur, 4 h avec 50 modules de PV-électrolyseurs, 6 h avec 150 modules et 9 h avec 250.

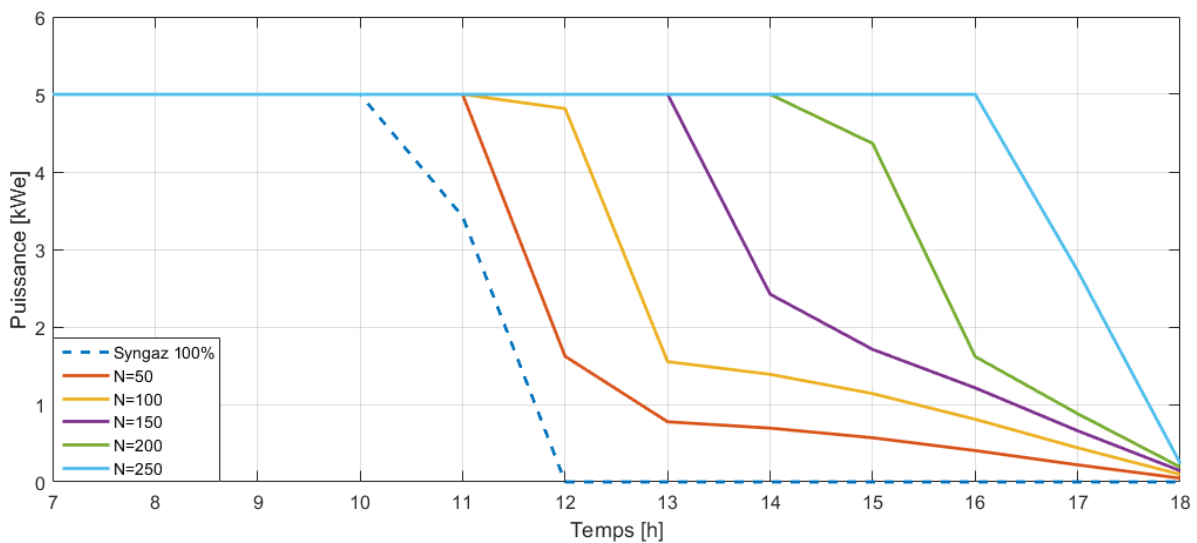


Figure 6 : Évolution de la puissance délivrée au cours de la journée-type suivant le nombre de modules panneau-électrolyseurs utilisés

La limite dans cette simulation est l'hypothèse d'une demande de puissance constante tout au long de la journée. Or, dans la pratique, la demande en énergie, dans le contexte de l'électrification rurale, varie beaucoup suivant les horaires de la journée. Suivant le jour de la semaine ou la saison dans l'année, la quantité d'énergie demandée pourrait aussi présenter une grande fluctuation, qui ne pourra toujours pas être en concordance avec la quantité d'ensoleillement. Il est donc possible qu'à certains moments, le volume d'hydrogène produit par les électrolyseurs solaires ne soit pas totalement consommé par le groupe électrogène. Il sera alors nécessaire, dans ce cas, soit de prévoir un système de stockage de l'hydrogène non consommé, soit de prévoir une torchère pour consommer l'excès.

3-3-3. Bilan énergétique

Le bilan énergétique du système hybride PV-électrolyseurs-gazogène-groupe électrogène est illustré sur la **Figure 7**. Les différentes pertes au niveau de chaque sous-système sont décrites à l'aide des rendements du processus de transformation de l'énergie. Pour les panneaux solaires photovoltaïques, le rendement de conversion de l'irradiation solaire G en puissance électrique ($V \times I$) varie de 12,87 à 14,07 % au cours de la journée type. Ces valeurs sont en accord avec les résultats, qui ont relevé des rendements de PV variant de 5 à 17,8. Quand cette énergie électrique est ensuite utilisée pour alimenter les électrolyseurs, le rendement de production du dihydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau varie de 85,77 à 97,92 %. D'après Pierre Millet [12], le rendement des électrolyseurs décroît quand la densité du courant traversant les électrodes augmente (à partir de 1 A/cm²). Ces valeurs de rendement élevées sont ainsi obtenues grâce à une faible densité du courant, car avec des électrodes sous forme de plaques métalliques ayant 0,25 m² de surface, la densité de courant maximale calculée au cours de la journée-type est de 0,0015 A/cm². Concernant la gazéification, [29, 30] ont affirmé que le rendement du processus de transformation de la biomasse à l'aide d'un gazogène co-courant est situé entre 50 et 80 %. Lorsque le syngaz produit est utilisé pour alimenter des groupes électrogènes, [30 - 32] ont trouvé, respectivement, des rendements de 21,30 %, 19,10 % et 21 %. Ainsi, le rendement global d'une centrale de production d'électricité peut être évalué aux alentours de 15 %. Cependant, selon [33, 34], en plus de l'augmentation du pouvoir calorifique du mélange, l'enrichissement du syngaz avec le dihydrogène peut aussi avoir comme effet l'amélioration du rendement du moteur grâce à une meilleure combustion apportée par la grande vitesse de flamme de l'hydrogène. C'est pourquoi on a pris comme hypothèse dans cet article un rendement de 30 % du groupe électrogène. Grâce à la transformation de l'énergie solaire photovoltaïque en énergie thermochimique du dihydrogène, il est possible de lisser la production d'électricité par rapport aux fluctuations des conditions météorologiques. C'est pourquoi, dans le système proposé, le courant électrique généré par les panneaux solaires est utilisé pour alimenter les électrolyseurs, mais n'est pas directement consommé par les utilisateurs. En effet, lors des journées très ensoleillées, le système peut produire plus de dihydrogène que lors des journées sans ou avec peu d'ensoleillement. Mais grâce à la régulation du mélange des débits de syngaz et de dihydrogène, la puissance fournie par le groupe électrogène peut être évolutive ou maintenue constante suivant les exigences.

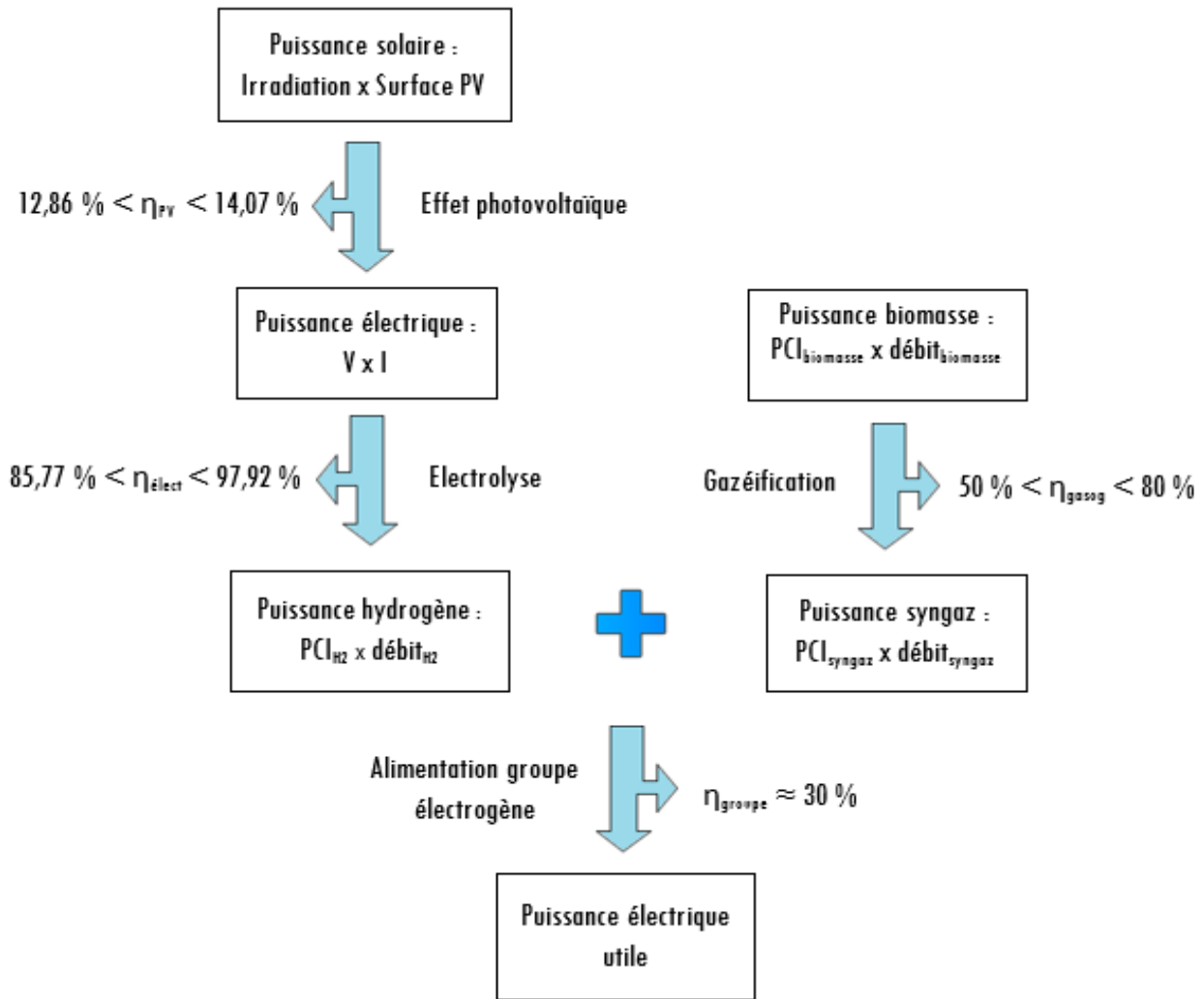


Figure 7 : Bilan énergétique du système hybride PV-électrolyseurs-gazogène-groupe électrogène

4. Conclusion

Le présent article montre le potentiel de l'hybridation de la gazéification de la biomasse, de l'électrolyse de l'eau et de l'énergie solaire photovoltaïque pour l'électrification rurale. Le site d'implantation de la centrale électrique est situé à Anjiajia, un village situé dans l'ouest de Madagascar. L'étude du couplage panneau-électrolyseur a permis de démontrer que pour soutirer le maximum de puissance des panneaux solaires, il faut alimenter 12 cellules d'électrolyseur branchées en séries par panneau. Avec cette configuration, un module de panneau-électrolyseur arrive à produire 131,58 L de dihydrogène à la fin de la journée-type, ce qui équivaut à une énergie de 1,42 MJ et une puissance de 32,87 W. L'ajout du dihydrogène produit par les modules panneau-électrolyseur dans le syngaz permet d'améliorer l'autonomie du système. Comparé à l'utilisation de syngaz pur, l'enrichissement a permis de retarder de 1h l'épuisement de ce stock avec 50 modules de panneau-électrolyseurs, 2 h avec 150, et 6h avec 250. En proposant ce système innovant pour améliorer les performances des centrales électriques à biomasse, cette étude contribue à l'amélioration de l'autonomie des groupes électrogènes à biomasse, implantés dans les zones rurales isolées du réseau électrique national.

Références

- [1] - H. P. LE et S. A. SARKODIE, « Dynamic linkage between renewable and conventional energy use, environmental quality and economic growth : Evidence from Emerging Market and Developing Economies », *Energy Rep.*, Vol. 6, (nov. 2020) 965 - 973 p., doi: 10.1016/j.egy.2020.04.020
- [2] - P. A. ØSTERGAARD, N. DUIC, Y. NOOROLLAHI, H. MIKULCIC et S. KALOGIROU, « Sustainable development using renewable energy technology », *Renew. Energy*, Vol. 146, (févr. 2020) 2430 - 2437 p., doi: 10.1016/j.renene.2019.08.094
- [3] - T. KÄBERGER, « Progress of renewable electricity replacing fossil fuels », *Glob. Energy Interconnect.*, Vol. 1, N° 1 (2018) 5 p.
- [4] - F. S. JAVADIB, RISMANCHI, M. SARRAF, O. AFSHAR, R. SAIDUR, H. W. PING, N. A. RAHIM, « Global policy of rural electrification », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 19, (mars 2013) 402 - 416 p., doi: 10.1016/j.rser.2012.11.053
- [5] - Y. A. SITUMORANG, Z. ZHAO, A. YOSHIDA, A. ABUDULA et G. GUAN, « Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 117, (janv. 2020) 109486 p., doi: 10.1016/j.rser.2019.109486
- [6] - E. R. WIDJAYA, G. CHEN, L. BOWTELL et C. HILLS, « Gasification of non-woody biomass: A literature review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 89, (juin 2018) 184 - 193 p., doi: 10.1016/j.rser.2018.03.023
- [7] - J. D. MARTINEZ, K. MAHKAMOV, R. V. ANDRADE et E. E. SILVA LORA, « Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines », *Renew. Energy*, Vol. 38, N° 1 (févr. 2012) 1 - 9 p., doi: 10.1016/j.renene.2011.07.035
- [8] - S. SZWAJA, V. B. KOVACS, A. BEREZKY et A. PENNINGER, « Sewage sludge producer gas enriched with methane as a fuel to a spark ignited engine », *Fuel Process. Technol.*, Vol. 110, (juin 2013) 160 - 166 p., doi: 10.1016/j.fuproc.2012.12.008
- [9] - L. HERNANDEZ-CALLEJO, S. GALLARDO-SAAVEDRA et V. ALONSO-GOMEZ, « A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance », *Sol. Energy*, Vol. 188, (août 2019) 426 - 440 p., doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017
- [10] - A. S. MUNDADA, K. K. SHAH et J. M. PEARCE, « Levelized cost of electricity for solar photovoltaic, battery and cogen hybrid systems », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 57, (mai 2016) 692 - 703 p., doi: 10.1016/j.rser.2015.12.084
- [11] - R. BHATTACHARYYA, A. MISRA et K. C. SANDEEP, « Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis : Conceptual design and analysis », *Energy Convers. Manag.*, Vol. 133, (févr. 2017) 1 - 13 p., doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.057
- [12] - A. GODULA-JOPEK, « *Hydrogen Production : by Electrolysis* », Ed. Wiley-VCH, Weinheim, (2015) 425 p.
- [13] - A. DJAFOUR, M. MATOUG, H. BOURAS, B. BOUCHEKIMA, M. S. AIDA et B. AZOUI, « Photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: Basic principles », *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 36, N° 6 (mars 2011) 4117 - 4124 p., doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.09.099
- [14] - Z. ABDIN, A. ZAFARANLOO, A. RAFIEE, W. MERIDA, W. LIPINSKI et K. R. KHALILPOUR, « Hydrogen as an energy vector », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 120, (mars 2020) 109620 p., doi: 10.1016/j.rser.2019.109620
- [15] - S. DUTTA, « A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource », *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol. 20, N° 4 (juill. 2014) 1148 - 1156 p., doi: 10.1016/j.jiec.2013.07.037
- [16] - R. MORADI et K. M. GROTH, « Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis », *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 44, N° 23 (mai 2019) 12254 - 12269 p., doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.041
- [17] - M. S. BENGHANEM et S. N. ALAMRI, « Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance », *J. Taibah Univ. Sci.*, Vol. 2, N° 1 (janv. 2009) 94 - 105 p., doi: 10.1016/S1658-3655(12)60012-0

- [18] - T. M. ISMAIL, K. RAMZY, B. E. ELNAGHI, M. N. ABELWHAB et M. A. EL-SALAM, « Using MATLAB to model and simulate a photovoltaic system to produce hydrogen », *Energy Convers. Manag.*, Vol. 185, (avr. 2019) 101 - 129 p., doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.108
- [19] - P. OLIVIER, C. BOURASSEAU et PR. B. BOUAMAMA, « Low-temperature electrolysis system modelling: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 78, (oct. 2017) 280 - 300 p., doi: 10.1016/j.rser.2017.03.099
- [20] - J. M. M. ANDRIAMAMPINANINA, L. RATSIMAMANGA RAZANAMPARANY et D. A. S. ANDRIATOAVINA, « Optimal Conception of an Embarked Hydrogen Generator for Injection of an Auxiliary Additional Combustible into Gasoline Engines », *Journal of Systems and Industrial Project Engineering*, 3 (1) (janv. 2017) 148 - 163 p.
- [21] - G. D. WILCOX et D. R. GABE, « Faraday's Laws of Electrolysis », *Trans. IMF*, Vol. 70, N° 2 (janv. 1992) 93 - 94 p., doi: 10.1080/00202967.1992.11870951
- [22] - Y. NAIMI et A. ANTAR, « Hydrogen Generation by Water Electrolysis », in *Advances In Hydrogen Generation Technologies*, Éd. InTech, (2018)
- [23] - O. ULLEBERG, « Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach », *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 28, N° 1 (janv. 2003) 21 - 33 p., doi: 10.1016/S0360-3199(02)00033-2
- [24] - D. FAKRA, C. L. JAVIER, D. MORAU, J. P. PRAENE et T. RAKOTONDRAMARIANA A. LAURET, « SIZER: a software dedicated to simulating the optimum size of a small biomass gasifier system », présenté à *3rd International Conference on Energy, Environment and Climate Change (ICEECC 2019)*, The Westin Turtle Bay Resort & Spa, Balaclava, Mauritius, (juill. 2019)
- [25] - D. FAKRA, D. MORAU, K. BAYANTE, M. H. RADANIELINA, T. RAKOTONDRAMARIANA, « Generalized protocol by systemic analysis for sizing a small scale gasifier engine system dedicated to power generation from biomass », présenté à *11th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2018)*, University of West Scotland, Paisley, UK, (mai 2018)
- [26] - T. B. REED et A. DAS, « Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems », Rapport technique, N°SERI/SP-271-3022, 5206099, USA, (mars 1988). doi: 10.2172/5206099
- [27] - C. R. FERGUSON et A. T. KIRKPATRICK, *Internal Combustion Engines Applied Thermosciences*, 3 rd Ed. John Wiley & Sons, Ltd, (2016)
- [28] - M. H. RADANIELINA, « Co-valorisation énergie et matière des résidus agricoles par pyro-gazéification », Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, (2018) 128 p.
- [29] - L. I. CHAVES, M. J. DA SILVA, S. N. MELEGARI DE SOUZA, D. SECCO, H. A. ROSA, C. E. C. NOGUEIRA et E. P. FRIGO, « Small-scale power generation analysis : Downdraft gasifier coupled to engine generator set », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 58, (mai 2016) 491 - 498 p., doi: 10.1016/j.rser.2015.12.033
- [30] - N. INDRAWAN, S. THAPA, P. R. BHOI, R. L. HUHNKE et A. KUMAR, « Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass », *Energy Convers. Manag.*, Vol. 148, (sept. 2017) 593 - 603 p., doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.066
- [31] - A. SHAH, R. SRINIVASAN, S. D. FILIP TO et E. P. COLUMBUS, « Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass based syngas », *Bioresour. Technol.*, Vol. 101, N° 12 (juin 2010) 4656 - 4661 p., doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.049
- [32] - P. RAMAN et N. K. RAM, « Performance analysis of an internal combustion engine operated on producer gas, in comparison with the performance of the natural gas and diesel engines », *Energy*, Vol. 63, (déc. 2013) 317 - 333 p., doi: 10.1016/j.energy.2013.10.033
- [33] - F. Y. HAGOS, A. R. A. AZIZ et S. A. SULAIMAN, « Methane enrichment of syngas (H₂/CO) in a spark-ignition direct-injection engine: Combustion, performance and emissions comparison with syngas and Compressed Natural Gas », *Energy*, Vol. 90, (oct. 2015) 2006 - 2015 p., doi: 10.1016/j.energy.2015.07.031
- [34] - B. SUBRAMANIAN et S. ISMAIL, « Production and use of HHO gas in IC engines », *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 43, N° 14 (avr. 2018) 7140 - 7154 p., doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.120