

Optimisation du dimensionnement d'un système multi-sources avec batteries alimentant une tour de télécommunication

Sofiane GHAFIRI⁽¹⁾, Dhaker ABBES⁽²⁾, Arnaud DAVIGNY⁽²⁾, Maxime DARNON⁽³⁾, Joao TROVAO⁽⁴⁾

(1) (L2EP) Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance, Junia Lille, Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique (3IT), Université de Sherbrooke, 3000 Boulevard Université, Sherbrooke, J1K 0A5 Québec, Canada. Courriel : soufiane.ghafiri@junia.com

(2) Univ. Lille, Arts et Metiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 – L2EP, F-59000 Lille, France, Courriel : dhaker.abbes@junia.com, arnaud.daviny@junia.com

(3) Maxime DARNON, Laboratoire Nanotechnologies Nanosystèmes (LN2) - CNRS IRL-3463 Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique (3IT), Université de Sherbrooke, 3000 Boulevard Université, Sherbrooke, J1K 0A5 Québec, Canada. Courriel : maxime.darnon@usherbrooke.ca

(4) João Pedro F. Trovão, e-TESC Lab., Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, J1K 2R1, Canada Polytechnic of Coimbra, IPC-ISEC and INESC Coimbra, Portugal. Courriel : joao.trova@usherbrooke.ca

RESUME – Les distributeurs de services de communication doivent installer des tours de télécommunication même dans les zones reculées afin d'assurer une couverture optimale du réseau de télécommunication sans « zones blanches » à leurs clients. Les zones reculées sont trop éloignées pour être desservies par le réseau électrique. L'une des solutions les plus utilisées est le générateur à combustible fossile (groupe électrogène). Le carburant produit beaucoup d'émissions de CO₂ et le coût de l'énergie (COE) est élevé. Les systèmes hybrides utilisant des énergies renouvelables et du stockage peuvent s'avérer plus fiables pour fournir de l'électricité et plus respectueux de l'environnement dans ce cas. Ainsi, ce travail porte sur l'optimisation de la fourniture d'énergie par l'utilisation d'un système multi-source à un site télécom éloigné dans le sud-est du Québec. L'objectif principal est de proposer un système économique et à faibles émissions de CO₂. Le logiciel HOMER Pro est utilisé pour concevoir et comparer les résultats pour différentes configurations. Trois sources d'énergie différentes ont été utilisées : l'énergie solaire photovoltaïque avec des panneaux bifaciaux, le groupe électrogène et les batteries Li-ion. Les résultats montrent qu'une configuration avec 60% de renouvelable et du stockage est un bon compromis entre le coût économique et le coût écologique (COE = \$0,544/kWh, émissions de CO₂ = 9 025 kg/an).

Mots-clés— Énergie solaire photovoltaïque, système multi-sources, site isolé, logiciel HOMER, optimisation, tour de télécommunication.

1. INTRODUCTION

En vue de la sécurisation d'alimentation en électricité des sites GSM isolés et dans le cadre d'une démarche de bon fonctionnement de ces sites, nous proposons la conception d'un système multi-source avec des énergies renouvelables (en particulier du solaire photovoltaïque double faces) pour alimenter un site GSM qui permet aux opérateurs de mobile d'étendre et offrir leurs réseaux en économisant leurs charges relatives à la consommation d'électricité et au carburant utilisé par les groupes électrogènes.

Le système multi-source sera utilisé d'une manière générale pour deux raisons principales :

- Assurer le fonctionnement de la station télécom en mode autonome ou en site isolé.

- Favoriser l'autoconsommation renouvelable afin de diminuer l'impact carbone de ces sites, économiser le coût du carburant et éviter le remplacement fréquent du groupe électrogène.

Dans la littérature consultée concernant la thématique du dimensionnement optimal des systèmes multi-sources et multi-stockages, la grande majorité des travaux portent sur des systèmes autonomes, non connectés au réseau [1] pour l'habitat. Très peu de travaux s'intéressent aux tours de télécommunication [2-3]. Une partie des travaux s'appuient sur l'utilisation de logiciels commerciaux tel que HOMER Pro [3]. D'autres développent par eux même des méthodes itératives ou d'optimisation tels que les algorithmes génétiques, la programmation dynamique ou linéaire [4]. Enfin, certains papiers traitent le problème par une simple simulation d'un modèle en faisant varier les données d'entrées [5].

Ainsi, ce travail porte sur l'optimisation de la fourniture d'énergie par l'utilisation d'un système multi-sources à un site télécom éloigné dans le sud-est du Québec. L'objectif principal est de proposer un système économique et à faible émissions de CO₂ tout en respectant les exigences en matière de fiabilité et de continuité de service. En effet, comparée à un habitat, une station de télécommunication doit être alimentée en permanence pour garantir une connectivité continue, même en cas de coupure d'électricité.

Le logiciel HOMER Pro est utilisé pour concevoir et comparer les résultats pour différentes configurations. Trois sources d'énergie différentes ont été utilisées : l'énergie solaire photovoltaïque avec des panneaux bifaciaux, le groupe électrogène et les batteries Li-ion. La méthode proposée suit quatre étapes :

- 1) Récolte et analyse des données météorologiques du site et de la consommation électrique de la station télécom
- 2) Modélisation et simulation du système hybride sous HOMER Pro
- 3) Optimisation du dimensionnement du système hybride
- 4) Choix de la meilleure configuration pour une mise en œuvre du système.

2. RECOLTE ET ANALYSE DES DONNEES METEOROLOGIQUES DU SITE ET DE LA CONSOMMATION ELECTRIQUE DE LA STATION TELECOM

2.1. Localisation

Le site choisi est près de Dorval-Lodge, dans le sud-est du Québec. Cette région n'est pas celle où la valeur d'irradiation est la plus élevée. Les données pour l'irradiation et la température sont générées par le logiciel HOMER Pro. Le logiciel télécharge les données de la NASA. Elles sont constituées de valeurs moyennes mensuelles sur une période de 22 ans.



Fig. 1. Site de la station télécom Dorval-Lodge, Canada.

2.2. Consommation du site

Dans notre système, nous avons deux charges différentes. La première est la tour de télécommunication. Elle sera alimentée en courant continu (3kW supposés sans interruption 24h par jour sur toute l'année). La seconde est le chauffage des batteries. Contrairement à la première, cette charge ne sera pas constante, car nous devons maintenir les batteries à une certaine température. En hiver, le chauffage fonctionnera beaucoup, mais en été, la température ambiante sera suffisante pour chauffer les batteries. Ainsi, notre pic sera de 500W pendant l'hiver (novembre à mars). Puis nous considérerons cette charge comme nulle les autres mois.

3. MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME HYBRIDE SOUS HOMER PRO

Le système est modélisé avec le logiciel HOMER Pro. Le groupe électrogène est connecté au bus AC (courant alternatif) avec le système de chauffage des batteries. Les panneaux solaires et les batteries sont connectés au bus DC (courant continu). La tour de télécommunication est également connectée au bus DC. Il y a un convertisseur bidirectionnel entre les deux bus (Fig. 2).

3.1. Les panneaux photovoltaïques bifaciaux

Les panneaux bifaciaux utilisent les côtés avant et arrière pour capter l'énergie lumineuse. Le côté arrière a une efficacité inférieure à celle du côté avant et son intérêt dépend beaucoup de la réflectance du sol du lieu. A Dorval-Lodge, la neige recouvre le sol environ la moitié de l'année. Un sol recouvert de neige a une forte réflectance (environ 45%), tandis qu'un sol sans neige a une réflectance de 7 à 15%, nous avons donc choisi d'uniformiser la réflectance durant l'année à 30%. L'inclinaison et l'azimut des panneaux sont déjà fixés à 30° pour l'inclinaison et 0° pour l'azimut (plein sud).

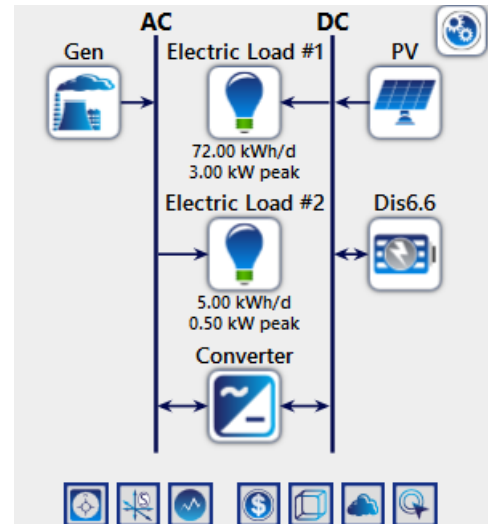


Fig. 2. Modélisation et simulation du système avec HOMER

Actuellement, les panneaux mono-faciaux et bifaciaux sont à peu près du même prix. La seule différence entre eux est leur efficacité. Pour la modélisation, nous considérons des panneaux STACE STA-PV72B 355 W [6] dont les spécifications techniques nous donnent les valeurs suivantes : l'efficacité de la face avant est de 18,2% et augmente à environ 21% en considérant la face arrière, selon les conditions d'utilisation (environ 15% de gain selon nos approximations). Aux panneaux, nous associons un MPPT (« Maximum Power Point Tracker ») avec une efficacité de 95%.

Tableau 1. Caractéristiques des panneaux photovoltaïques pour la simulation HOMER PRO

Données à entrer à HOMER	Spécifications
Panel Type (Type de Panneau)	Flat Plate
Capacity (Puissance de Référence pour les Calculs HOMER)	1 kW
Capital Cost (Coût initial)	\$2,500
Replacement (Coût de Remplacement)	\$2,500
O&M Cost (Coût d'Opération et de Maintenance)	\$10/Year
Lifetime (Durée de vie)	25 Years
Derating Factor (Facteur de Dégradation)	80%
Ground Reflectance (Réflectance au Sol)	30%
Temperature Coefficient (Coefficient de Température)	-0,428%/°C
Operating Temperature (Température de Fonctionnement)	45,2°C
Panel Slope (Inclinaison du Panneau)	30°
Panel Azimuth (Orientation du Panneau)	0°
MPPT Efficiency (Rendement MPPT)	95%
Panel Efficiency (Rendement Panneau)	21%

3.2. Les batteries

Les batteries doivent être à 48V pour être connectées au bus DC de la tour. Le modèle retenu est le Discover AES Li-ion 6,6kWh 48VDC, déjà utilisé par l'exploitant de la station.

Pour l'état de charge minimum de la batterie SOCmin, nous avons effectué des simulations pour cinq valeurs différentes, 10%, 16%, 20%, 25% et 30%. Les deux meilleures valeurs sont donc 10 et 16%. Sur le site existant, le SOCmin est à 16%. C'est pourquoi nous avons décidé de conserver la valeur de 16% pour le reste de l'optimisation. Par curiosité, nous avons également rapidement étudié le cas pour l'état de charge maximum SOCmax qui est à 100% par défaut. Nous avons donc testé les valeurs 100%, 90% et 80%. Nous avons constaté qu'il n'y avait pas de différence évidente dans les résultats et que le 100% était toujours le meilleur. Nous gardons donc également cette valeur.

Tableau 2. Caractéristiques des batteries pour la simulation HOMER PRO

Données à entrer à HOMER	Spécifications
Battery Type (Type de Batterie)	Li-Ion
Nominal Voltage (Tension Nominale)	48 V
Capital Cost (Coût initial)	\$6,915
Replacement (Coût de remplacement)	\$6,915
O&M Cost (Coût d'Opération et de Maintenance)	\$0/Year
Lifetime (Durée de Vie)	10 Years
Nominal Capacity (Capacité Nominale)	6.24 kWh
Maximum Capacity (Capacité Maximale)	130 Ah
Roundtrip Efficiency (Rendement charge-décharge)	95%
Maximum Charge Current (Courant Maximal de Charge)	150 A
Maximum Discharge Current (Courant Maximal de Décharge)	600 A
Maximum Charge Rate (Taux de Charge Maximum)	1 A/Ah
State Of Charge min (SOCmin) (Etat de Charge Minimal)	16%
State of Charge max (SOCmax) (Etat de Charge Maximal)	100%

3.3. Le groupe électrogène

Le groupe électrogène utilisé est celui proposé par défaut par HOMER Pro. Le seul paramètre que nous modifierons est le prix du carburant. Ainsi, notre groupe électrogène est équipé d'un moteur diesel avec une consommation de 0,236 L/hr/kW et une émission de CO₂ de 16,5 g/L de carburant. Son capital initial est basé sur le prix de référence 750 \$/kW soit 15 000\$ pour un groupe de 20 kW. Le ratio de charge minimum du groupe électrogène est la charge minimale autorisée, en pourcentage de sa capacité nominale. Spécifier une charge minimale n'empêche pas le générateur d'être arrêté, cela l'empêche simplement de fonctionner à une charge trop faible. Cette entrée existe car certains fabricants recommandent que leurs groupes électrogènes ne fonctionnent pas en dessous d'une certaine charge. Dans notre cas, la valeur préconisée après plusieurs simulations est celle par défaut 25%.

Tableau 3. Caractéristiques du groupe électrogène pour la simulation HOMER PRO

Données à entrer à HOMER	Spécifications
Fuel Curve Intercept (Interception de la Courbe de Combustion)	0.207 L/hr
Fuel Curve Slope (Pente de la Courbe de Combustion)	0.236 L/hr/kW
Initial Capital (Coût Initial)	\$750/kW
Replacement (Coût de Remplacement)	\$750/kW
O&M Cost (Coût d'Opération et de Maintenance)	\$0.030/Year
Lifetime (Durée de vie)	15,000 Hours
Minimum Load Ratio (Ratio de Charge Minimum)	25%

3.4. L'onduleur bidirectionnel

Comme nous avons des charges à la fois sur les bus AC et DC et que nous ne voulons pas utiliser tous les générateurs, nous avons besoin d'un convertisseur qui puisse fonctionner dans les deux sens. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4. Caractéristiques de l'onduleur pour la simulation HOMER PRO

Données à entrer à HOMER	Spécifications
Capital Cost (Coût Initial)	\$300
Replacement (Coût de Remplacement)	\$300
O&M Cost (Coût d'Opération et de Maintenance)	\$0/year
Capacity (Puissance de Référence)	1 kW
Lifetime (Durée de Vie)	15 Years
Inverter Efficiency (Rendement)	95%
Rectifier Relative Capacity (Rendement du redresseur)	100%
Rectifier Efficiency (Rendement de l'onduleur)	95%

4. OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME HYBRIDE

HOMER Pro utilise un algorithme non-différentiel pour analyser et découvrir l'architecture la plus rentable. Il calcule toutes les combinaisons possibles puis les classe selon le critère choisi (économique, écologique, taux de pénétration renouvelables, etc.). Il permet aussi une analyse de sensibilité en variant les données d'entrée (données météo, coûts des systèmes, prix du fuel, état de charge minimal des batteries, etc.).

4.1. Les fonctions retenues pour l'optimisation

- Le coût moyenné de l'énergie (COE), calculé par HOMER à travers l'équation (1).

$$COE = Ctan / (Els + EGrid) \quad (1)$$

$Ctan$ représente le coût annuel total, Els décrit l'énergie totale fournie par notre architecture à la charge et $EGrid$ est l'énergie fournie au réseau. Dans notre cas, nous travaillons sur un site non connecté au réseau, donc $EGrid$ sera zéro.

- Le coût actuel net (CNPC) est calculé par HOMER Pro à travers l'équation (2).

$$CNPC = C_{tan} / CRF(i, n) \quad (2)$$

Où C_{tan} représente le coût annuel total, i est le taux d'actualisation réel annuel et n représente le nombre d'années. CRF est une fonction qui renvoie le facteur de récupération du capital (3).

$$CRF(i, n) = [i(1 + i)^n] / [(1 + i)^n - 1] \quad (3)$$

Après quelques recherches, nous sommes tombés sur le taux d'actualisation réel annuel. Il est de 6,33 % pour octobre 2022 [7]. Pour le mettre dans HOMER Pro, nous réglons l'inflation à 0 % et le taux d'actualisation nominal à la valeur du taux d'actualisation réel.

L'ensemble des coûts sont en \$ américain. L'étude étant menée entre septembre et octobre 2022, il y avait une quasi-égalité entre 1 euro et 1 dollar américain. A cette période, le prix du carburant au Canada est de 1,4\$/L [8].

- Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en Kg/an dues au fonctionnement du groupe électrogène.

- La fraction renouvelable est la fraction de l'énergie fournie à la charge qui provient de sources d'énergie renouvelables. HOMER calcule la fraction renouvelable en utilisant la formule suivante :

$$f_{ren} = 1 - \frac{E_{nonren}}{E_{served}} \quad (4)$$

Avec E_{nonren} la production d'électricité non renouvelable [kWh/an] et E_{served} la charge électrique totale servie [kWh/an], énergie vendue au réseau incluse.

HOMER abrège la fraction renouvelable en « Frac. Ren. » dans les tableaux des résultats de sensibilité et d'optimisation comme le montre la figure 3.

4.2. Résultats

Les résultats d'optimisation en variant la fraction renouvelable sont consolidés dans le tableau 5. Les variations des objectifs NPC (\$) et CO₂ émissions (Kg/an) en fonction de la fraction renouvelable sont présentées dans la figure 4.

Les résultats montrent qu'une configuration avec 60% de renouvelable et du stockage est un bon compromis entre le coût économique et le coût écologique (Tableau 6). Une solution 100% renouvelable n'est pas envisageable. Il n'est pas raisonnable d'enlever le groupe électrogène car cela générerait une énorme quantité de panneaux et de batteries, et nous n'avons pas nécessairement l'espace pour tout mettre. De plus, le coût serait beaucoup plus élevé et, comme nous l'avons déjà mentionné, la fabrication de panneaux et de batteries cause beaucoup de pollution (en particulier des émissions CO₂). De plus, une solution de secours avec un groupe électrogène est requise pour une tour de télécommunication.

Tableau 5. Résultats d'optimisation HOMER PRO en fonction de la fraction renouvelable

Ren. Frac [%]	NPC [\$]	COE [\$]	Fuel [L/an]	CO2 [Kg/an]	Puissance PV (kW)	Nbre Panneaux	Surface des panneaux (m²)	Nbre Batteries
0	187231	0,538	8770	22957	0	0	0	0
26,4	164501	0,472	6055	15849	9,04	27	54	1
50	182907	0,525	4288	11224	19,9	59	118	3
60	192783	0,554	3448	9025	21,3	63	126	5
70	203896	0,585	2578	6747	23,7	70	140	7
80	228518	0,656	1715	4489	30,9	91	182	9
90	287279	0,825	0,853	2233	51,3	151	302	11
100	708307	2,04	0	0	132	389	778	30

Architecture							Cost				System				Gen	
PV (kW)	PV-MPPT	Gen (kW)	Dis	Converter (kW)	Dispatch		NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)	CO ₂ (kg/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (L)
21.3	1.00	3.70	5	4.85	LF		€192,783	€0.554	€8,134	€91,981	60.0	3,448	9,025	3,846	11,240	3,448
132	1.00	30	12.2	12.2	CC		€708,307	€2.04	€13,574	€540,091	100	0	0			

Fig. 3. Interface des résultats d'optimisation HOMER PRO

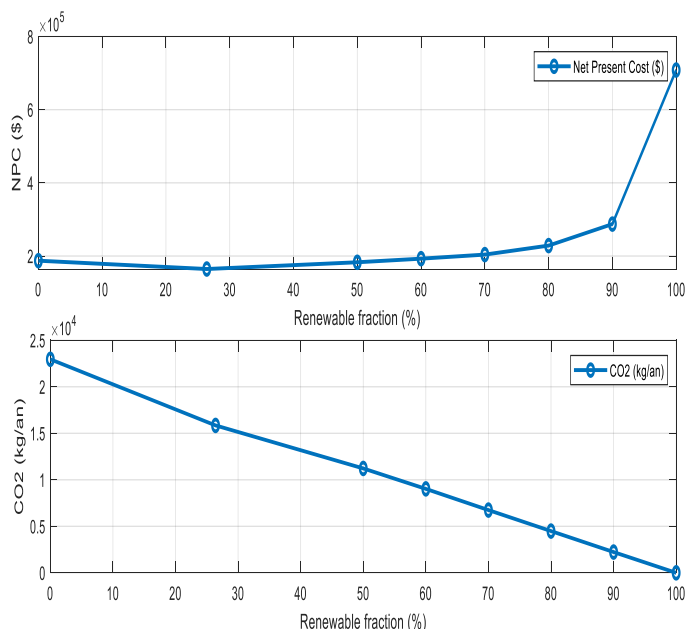


Fig. 4. Variations des objectifs NPC (\$) et CO₂ émissions (Kg/an) en fonction de la fraction renouvelable

Tableau 6. Configuration optimale retenue

	Résultats
Puissance PV	21,3 kW
Nombre de panneaux bifaciaux	63
Surface totale des panneaux PV	126 m ²
Nombre de batteries Li-ion 130 Ah 48V	5
Puissance optimale du groupe électrogène	3,7 kW
Consommation de fuel	6 055 L/an
CO ₂ emissions	9 025 kg/an
Coût net actualisé NPC	€192 783
Coût moyenné de l'énergie COE	€0,544

5. CONCLUSIONS

En tant que solution alternative pour alimenter une antenne de télécommunication dans un endroit reculé au Canada, un système d'énergie hybride hors réseau composé d'un groupe électrogène, de batteries et de panneaux photovoltaïques bifaciaux a été proposé. Avec le logiciel HOMER Pro, un dimensionnement optimal multicritère a été effectué. Les résultats montrent qu'une configuration avec 60% de renouvelable et du stockage est un bon compromis entre le coût économique et le coût écologique (COE = \$0,544/kWh,

émissions de CO₂ = 9 025 kg/an). Une telle configuration permet de réduire les déplacements et les interventions sur place en réduisant les besoins en combustible. Malheureusement, une solution 100% renouvelable n'est pas envisageable en raison du coût élevé et de la surface disponible pour l'installation.

De plus, les simulations effectuées et les analyses de sensibilité permettent d'améliorer l'utilisation de la génératrice, grâce à l'ajustement des paramètres de contrôle dans un contexte climatique québécois.

Enfin, comme évoqué précédemment, HOMER ne procède pas à une optimisation mathématique proprement dite. Il utilise un algorithme non-différentiel pour analyser et déterminer l'architecture la plus rentable. Il examine toutes les possibilités et les évalue en fonction du critère sélectionné (coût, impact environnemental, taux d'utilisation des sources renouvelables, etc.). Ainsi, une des perspectives de ce travail, est de développer notre propre outil d'optimisation du dimensionnement des systèmes hybrides multi-sources avec stockage.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à La région Hauts-de-France, au Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) du Canada et au Ministère de l'Economie, de l'Innovation et de l'Energie du Québec dans le cadre du projet SAFE-TELECOM ((ALLRP 558371-20 et Prompt 144 Darnon-Bell 2020.06. Le support de Bell Mobilité and STACE est également remercié.

7. REFERENCES

- [1] ABBES, Dhaker, MARTINEZ, André, et CHAMPENOIS, Gérard. Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2014, vol. 98, p. 46-62.
- [2] KUETCHE, Christelle Flora Majoh, TSUANYO, David, et FOPAH-LELE, Armand. Analysis of Hybrid Energy Systems for Telecommunications Equipment: A Case Study in Buea Cameroon. In : *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2022. p. 02007.
- [3] ZELJKOVIĆ, Čedomir, MRŠIĆ, Predrag, ERCEG, Bojan, et al. Optimal sizing of photovoltaic-wind-diesel-battery power supply for mobile telephony base stations. *Energy*, 2022, vol. 242, p. 122545.
- [4] J. L. Bernal-Agustín et R. Dufo-López, «Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 18, pp. 2111-2118, 2009.
- [5] RANABOLDO, Matteo, LEGA, Bruno Domenech, FERRENBACH, David Vilar, et al. Renewable energy projects to electrify rural communities in Cape Verde. *Applied energy*, 2014, vol. 118, p. 280-291.
- [6] Documentation technique des panneaux bifaciaux STA-PV72B 355 W: https://www.stacelectric.com/wp-content/uploads/2016/10/STA-PV72B-SERIE_EN_R02.pdf
- [7] Interest and exchange rates in Canada, 10/31/2022 : <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/recgen/txt/taux-rates-eng.html>
- [8] Prix du carburant au Canada, 10/17/2022 https://fr.globalpetrolprices.com/Canada/gasoline_prices/