

PROPOSITION DE THÈSE 2026

>Réf: Avant-projet de thèse N°ED/02/2026

Titre du projet	Développement d'une approche intelligente de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/diesel/batteries assistée par l'intelligence artificielle et le jumeau numérique
Mots clés	Accessibilité économique, Apprentissage automatique, Batterie de stockage, Dimensionnement optimal, Fiabilité technique, Intelligence artificielle, Jumeau numérique, Optimisation multicritères, Photovoltaïque, Système hybride PV/diesel
Contexte et enjeux	Les enjeux énergétiques auxquels fait face le monde aujourd'hui exigent que l'intérêt accordé aux énergies renouvelables au cours de la dernière décennie, en particulier le solaire, [1] soit maintenu et même accentué. En effet, l'énergie est un pilier essentiel du développement socio-économique de toute société. L'accès à une énergie fiable et durable reste toutefois un défi majeur dans de nombreuses régions du monde, et tout particulièrement en Afrique subsaharienne. Selon le rapport Tracking SDG7 : The Energy Progress Report 2026, sur les 655 millions de personnes encore privées d'électricité dans le monde en 2024, 563 millions vivent en Afrique subsaharienne, soit 86 % du déficit mondial d'accès, contre seulement 49 % en 2010. La région concentre désormais l'essentiel du retard d'électrification, le rythme de raccordement peinant à dépasser celui de la croissance démographique [2]. L'immense potentiel solaire de l'Afrique, caractérisé par un ensoleillement annuel moyen supérieur à 1900 kWh/m² sur près de 74% du continent, offre une perspective encourageante pour surmonter les défis d'accès à l'électricité qui entravent son développement socio-économique. Cette ressource naturelle est encore malheureusement sous-utilisée au niveau du continent. C'est dans ce contexte que des initiatives d'envergure telles que Mission 300, portée par la Banque mondiale et la Banque africaine de développement, ambitionnent de raccorder 300 millions de personnes d'ici 2030 en s'appuyant explicitement sur une combinaison d'extension du réseau, de mini-réseaux et de solutions solaires hors-réseau, confirmant le rôle central des systèmes décentralisés dans l'électrification du continent. Dans ce contexte, privilégier l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque, apparaît comme une démarche pertinente face aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels. Cependant, il est important de reconnaître que le solaire photovoltaïque présente certaines limites, telles que son intermittence. Par ailleurs, dans les zones isolées ou hors-réseau du continent, l'approvisionnement en électricité repose généralement sur des générateurs diesel. Bien que fiables, ces générateurs présentent des inconvénients

	majeurs, tels que des coûts d'exploitation élevés en raison du prix fluctuant des combustibles fossiles, une forte dépendance à des ressources non renouvelables, et une contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre. Face à ces défis, les systèmes énergétiques hybrides (SEH), qui intègrent des sources d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque avec des générateurs diesel et des batteries de stockage offrent une alternative prometteuse. L'énergie solaire, abondante, permet de réduire la consommation de carburant fossile, tandis que les batteries de stockage jouent un rôle crucial en garantissant la continuité de l'approvisionnement en électricité en stockant l'énergie excédentaire produite pendant la journée pour une utilisation nocturne ou lors des périodes de faible ensoleillement. Toutefois, malgré leurs avantages, les SEH PV/diesel/batteries présentent également des défis complexes en matière de conception et de dimensionnement. La variabilité de la ressource solaire constitue un obstacle majeur : la production photovoltaïque est intermittente et dépend des conditions météorologiques, ce qui rend complexe la prédiction de la production énergétique. En parallèle, le coût des batteries, bien qu'en baisse grâce aux avancées technologiques, restent un facteur économique déterminant, influençant la rentabilité à long terme de ces systèmes. Le dimensionnement optimal de ces systèmes consiste ainsi à trouver le juste équilibre entre les capacités de production solaire, les besoins en stockage d'énergie, et l'utilisation des générateurs diesel pour assurer une fourniture électrique fiable et durable à un coût compétitif. Une approche mal calibrée pourrait conduire soit à un surdimensionnement, augmentant les coûts d'investissement inutiles, soit à un sous-dimensionnement, compromettant la fiabilité du système. Bien que de nombreux modèles aient été développés dans la littérature scientifique pour aider à la conception des SEH PV/diesel [3-14], une analyse approfondie de ces derniers mérite toujours d'être faite afin de dégager leurs limites actuelles et par la suite, proposer une approche plus adaptée et plus optimisée pour leur conception et dimensionnement.
Objectifs	• Objectif général L'objectif principal de cette thèse est de développer une approche intelligente de dimensionnement optimal des systèmes hybrides PV/diesel avec batteries de stockage, assistée par l'intelligence artificielle et le jumeau numérique. La nouvelle approche devrait permettre d'optimiser l'efficacité énergétique, réduire les coûts de production de l'énergie, et minimiser l'impact environnemental, tout en garantissant une fourniture d'électricité fiable dans divers contextes d'application. • Objectifs spécifiques De façon spécifique, il s'agira de : ➤ Développer un modèle mathématique intégrant les composantes PV, diesel, et batteries pour simuler le fonctionnement global du système hybride ; ➤ Concevoir une stratégie d'optimisation multi-critères des systèmes hybrides PV/diesel/batteries reposant sur des algorithmes métaheuristiques avancés et des techniques d'intelligence artificielle. Cette stratégie doit prendre en compte toutes les différentes configurations des systèmes hybrides PV/diesel/batteries ;

	➤ Développer un modèle permettant d'évaluer les impacts environnementaux des systèmes hybrides PV/diesel/batteries à l'aide d'une analyse du cycle de vie (ACV), en se concentrant notamment sur les émissions de CO₂ et la gestion des déchets ; ➤ Développer des modèles d'apprentissage automatique pour la prévision de la ressource solaire et de la demande énergétique, ainsi qu'un jumeau numérique du système hybride permettant la simulation et la gestion optimisée en temps réel ; ➤ Tester et valider expérimentalement les performances de la nouvelle approche ; ➤ Contribuer à l'amélioration du logiciel de conception et dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel/batteries, KYA-Hybrid Design en cours de développement auprès du partenaire KYA-Energy Group.
Références citées	[1] IPCC, « Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6) - Longer report », AR6 SYR, 2023. Disponible sur : https://report.ipcc.ch/ar6sy/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf [2] « World Bank Open Data », World Bank Open Data. Consulté le : 5 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://data.worldbank.org [3] A. Micangeli <i>et al.</i>, « Energy Production Analysis and Optimization of Mini-Grid in Remote Areas: The Case Study of Habaswein, Kenya », <i>Energies</i>, vol. 10, no 12, p. 2041, déc. 2017, doi: 10.3390/en10122041. [4] K. Anoune, M. Bouya, A. Astito, et A. B. Abdellah, « Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review », <i>Renew. Sustain. Energy Rev.</i>, vol. 93, p. 652-673, oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.032. [5] « The GridShare solution: a smart grid approach to improve service provision on a renewable energy mini-grid in Bhutan - IOPscience ». https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/014018/meta (consulté le 6 juin 2023). [6] A. B. Marful, O. Kornyo, M. Asante, R. Opoku, D. Y. A. Duah, et B. Tei-Partey, « Integration of Advanced Metering Infrastructure for Mini-Grid Solar PV Systems in Off-Grid Rural Communities (SoAMIRural) », <i>Sustainability</i>, vol. 15, no 9, p. 7526, janv. 2023, doi: 10.3390/su15097526. [7] Md. R. R. Bhuyian, R. Mostafa, Md. F. Khan, et U. Zobayer, « Application of smart grid techniques for effective control in a mini-grid system », in <i>2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET 2012)</i>, janv. 2012, p. 1-4. [8] I. Abada, M. Othmani, et L. Tatry, « An innovative approach for the optimal sizing of mini-grids in rural areas integrating the demand, the supply, and the grid », <i>Renew. Sustain. Energy Rev.</i>, vol. 146, p. 111117, août 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111117. [9] S. O. Frimpong, R. C. Millham, et I. E. Agbehadji, « A Comprehensive Review of Nature-Inspired Search Techniques Used in Estimating Optimal Configuration Size, Cost, and Reliability of a Mini-grid HRES: A Systemic Review », in <i>Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021</i>, O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, C. Garau, I. Blečić, D. Taniar, B. O. Apduhan, A. M. A. C. Rocha, E. Tarantino, et C. M. Torre, Éd., in <i>Lecture Notes in Computer Science</i>. Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 492-507. doi: 10.1007/978-3-030-87013-3_37.

	[10] T. The Hoang, Q. Tuan Tran, et Y. Besanger, « An advanced protection scheme for medium-voltage distribution networks containing low-voltage microgrids with high penetration of photovoltaic systems », <i>Int. J. Electr. Power Energy Syst.</i>, vol. 139, p. 107988, juill. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.107988. [11] Q. L. Lam, A. I. Bratcu, D. Riu, C. Boudinet, A. Labonne, et M. Thomas, « Primary frequency H^∞ control in stand-alone microgrids with storage units: A robustness analysis confirmed by real-time experiments », <i>Int. J. Electr. Power Energy Syst.</i>, vol. 115, p. 105507, févr. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105507. [12] P. Cicilio, M. Orosz, A. Mueller, et E. Cotilla-Sanchez, « uGrid: Reliable Minigrid Design and Planning Toolset for Rural Electrification », <i>IEEE Access</i>, vol. 7, p. 163988-163999, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952896. [13] H. Louie et P. Dauenhauer, « Effects of load estimation error on small-scale off-grid photovoltaic system design, cost and reliability », <i>Energy Sustain. Dev.</i>, vol. 34, p. 30-43, oct. 2016, doi: 10.1016/j.esd.2016.08.002. [14] D. Fioriti <i>et al.</i>, « Stochastic sizing of isolated rural mini-grids, including effects of fuel procurement and operational strategies », <i>Electr. Power Syst. Res.</i>, vol. 160, p. 419-428, juill. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.03.020.
Approche et Résultats attendus	• Résultats, produits attendus et perspectives de valorisation Les principaux résultats et produits attendus de cette thèse sont les suivants : ➤ Une nouvelle méthode intelligente de dimensionnement des systèmes hybrides, assistée par l'intelligence artificielle et le jumeau numérique, qui optimise l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes hybrides, suivant les localités géographiques. ➤ Un modèle économique robuste démontrant la rentabilité des systèmes hybrides optimisés. ➤ Des recommandations pratiques pour le déploiement de systèmes hybrides dans des contextes variés (résidentiels, zones rurales, industries, infrastructures critiques, différentes zones géographiques) ; ➤ L'amélioration du logiciel KYA-Hybrid Design développé par le partenaire KYA-Energy Group pour les systèmes hybrides. • Approche méthodologique La méthodologie proposée se divise en plusieurs phases, chacune abordant des aspects clés du dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel/batteries. Il s'agit de : ➤ Revue de la littérature ; ➤ Modélisation et simulation des systèmes hybrides PV/diesel/batteries ; ➤ Développement d'une approche d'optimisation multi-critères ; ➤ Validation expérimentale de l'approche proposée ; ➤ Amélioration du logiciel de dimensionnement des systèmes hybrides PV/diesel/batteries en cours de développement chez le partenaire KYA. • Outils ➤ Le doctorant utilisera les licences des logiciels développés ou en cours de développement par le partenaire KYA, et au besoin ce dernier

	obtiendra des licences d'autres logiciels nécessaires pour la bonne conduite de la thèse. ➤ Un banc de test sera mis en œuvre pour les expérimentations dans le cadre de la thèse. • Partenariat Cette thèse sera réalisée en partenariat avec l'entreprise KYA-Energy Group basée à Lomé (Togo)
Laboratoire d'accueil	Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) et laboratoires partenaires
Direction et Encadrement	▪ Directeurs de thèse : Dr (MC) Daniel YAMEGUEU NGUEWO (2iE) et Prof. Yao AZOUMAH (KYA-Energy Group) Encadrement : Hervé SIRIMA, Mamadou DIOP
Date de démarrage	Octobre 2026
Durée	3 ans + 1 an (dérogation)
Profil du candidat	▪ Master recherche ou diplôme d'ingénieur en génie énergétique, Génie électrique, Automatismes, Génie des procédés ou tout autre diplôme jugé équivalent ▪ Goût de l'expérimentation : Une partie importante de ce travail est basée sur des résultats expérimentaux à collecter par le doctorant ▪ Autonome, dynamique, bon relationnel ▪ Bonne maîtrise de l'anglais indispensable
Pour postuler	Le dossier de candidature doit comprendre : ▪ Une lettre de motivation ▪ Un curriculum vitae détaillé ▪ Une photocopie légalisée du diplôme du BAC ▪ Une photocopie légalisée du diplôme ou attestation définitive de Master ou équivalent ▪ Deux lettres de recommandation ▪ Les photocopies légalisées des relevés de notes de licence et Master ou équivalent ▪ Le rapport de mémoire de Master Les candidatures se font exclusivement en ligne à l'adresse suivante : https://dev.2ie-edu.org/candidatures/formulaire/61 Le délai de candidature est fixé au 30 septembre 2026 à 23h59 GMT. <u>Aucun dossier physique ou envoyé par email ne sera recevable.</u> Pour tout renseignement contacter : Prof Igor OUEDRAOGO Tél : (226) 78 75 80 72 E-Mail: igor.ouedraogo@2ie-edu.org