





Résumé de la thèse

La décarbonation des secteurs industriels à forte consommation d'énergie, en particulier l'industrie minière, constitue un enjeu majeur de la transition vers des systèmes énergétiques durables. Les opérations minières se caractérisent par une demande énergétique élevée, continue et peu flexible, historiquement couverte par des sources fossiles, ce qui entraîne des émissions importantes de gaz à effet de serre et des coûts d'exploitation élevés. Dans ce contexte, l'intégration du solaire photovoltaïque (PV) apparaît comme une solution prometteuse pour réduire l'empreinte carbone et améliorer l'efficacité énergétique. Toutefois, cette intégration est confrontée à plusieurs défis majeurs, notamment la variabilité et l'intermittence de la ressource solaire, la dégradation des performances liée au soiling, ainsi que la nécessité de systèmes de stockage performants.

Cette thèse propose une approche intégrée pour répondre à ces défis et l'appliquer aux sites miniers du Groupe OCP au Maroc. Dans un premier temps, les spécificités énergétiques des environnements miniers sont analysées, ce qui met en évidence la nécessité de systèmes hybrides fiables et robustes. Un état de l'art approfondi des technologies photovoltaïques et des méthodes de prévision solaire est ensuite présenté, en soulignant leurs limites dans les environnements industriels sévères.

Une contribution majeure de ce travail réside dans le développement de modèles hybrides de deep learning pour la prévision du rayonnement solaire. Ces modèles combinent des réseaux convolutionnels (CNN), des architectures récurrentes (LSTM/GRU) et des mécanismes d'attention (Transformers) afin de capturer les dynamiques temporelles à différentes échelles. L'intégration de variables atmosphériques, notamment les particules fines (PM10 et PM2.5), permet d'améliorer significativement la précision des prévisions dans les environnements semi-arides, avec des gains pouvant atteindre 30 à 35 %.

Par ailleurs, l'impact des conditions environnementales sur la performance des systèmes photovoltaïques est étudié au moyen de l'analyse du phénomène de « soiling ». Une campagne de mesure d'un an a permis d'estimer un taux moyen d'encrassement de l'ordre de 0,30 % par jour, ce qui entraîne des pertes énergétiques d'environ 5,8 % de la production annuelle. Afin de limiter ces pertes, une stratégie dynamique de nettoyage est proposée, qui



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

permet de les réduire à 1,9 % et de générer un gain économique estimé à environ 230 000 dollars. Cette approche surpasse les stratégies conventionnelles à fréquence fixe ou à seuil, en intégrant des critères à la fois techniques et économiques.

Dans un second temps, un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques hybrides PV-stockage est développé, fondé sur une formulation de programmation linéaire. Ce modèle intègre la variabilité solaire, la dynamique de stockage et les effets du soiling pour déterminer les configurations optimales du système. Les résultats montrent que le photovoltaïque peut couvrir environ 30 % de la demande énergétique annuelle, tandis que le stockage (de l'ordre de 20 MWh) améliore significativement la flexibilité du système. Toutefois, le coût d'investissement du stockage demeure un facteur limitant. L'analyse met également en évidence une réduction des émissions de CO₂ d'environ 15 % et un coût actualisé de l'électricité (LCOE) compris entre 0,06 et 0,10 \$/kWh, ce qui confirme la compétitivité du système dans un contexte industriel.

Dans l'ensemble, cette thèse démontre que la combinaison de méthodes avancées de prévision, de modélisation environnementale et d'optimisation énergétique constitue une approche robuste et pertinente pour améliorer les performances, la fiabilité et la durabilité des systèmes énergétiques en milieu minier. Les résultats obtenus offrent des perspectives concrètes pour la transition énergétique du secteur minier et contribuent au développement de solutions innovantes d'intégration des énergies renouvelables à grande échelle.

Mots clés : Énergie solaire, PV, CSP, Encrassement, Dépôt de poussière, Limitation de l'encrassement, Optimisation du nettoyage