الجمهورية الشعبية الديمقراطية الجزائرية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة العليا للإعلام الآلي 8 ماي 5491 - سيدي بلعباس
Higher School of Computer Science
8 Mai 1945 - Sidi Bel Abbes

Thesis

To obtain the diploma of **Master's Degree**

Field of Study: **Computer Science**

Specialization: **Ingénierie des Systèmes Informatiques (ISI)**

Theme

AI Driven Fault Detection in Solar Farm Systems: State of the art

---

Presented by
Khelif Ibtissem Lidia

Submission Date: **08th July, 2025**
In front of the jury composed of

Dr. Nassima DIF	President of the Jury
Pr. Sidi Mohammed BENSLIMANE	Supervisor
Dr. Oussama SERHANE	Supervisor
Dr. Imene NEGGAZ	Examiner
Dr. Mohamed KECHAR	Incubator Representative

Academic Year: 2024/2025

Abstract

Solar farms are quickly becoming cornerstones of the world's shift to clean energy, yet operating them at peak efficiency remains a complex puzzle. Manual inspections, simple threshold alarms, and after-the-fact repairs still dominate many large-scale installations an approach that drives up costs and leaves precious generation on the table.

Enter artificial intelligence. By tapping into the flood of data coming from sensors, cameras, and weather feeds, modern AI and machine-learning engines can spot problems, forecast power output, and even schedule maintenance before any human lifts a spanner. From teaching convolutional neural nets to flag micro-cracks in electroluminescence images with better than 98% accuracy, to deploying ensemble time-series models that nail day-ahead forecasts 99.98% of the time, these techniques are rewriting the playbook for solar operations.

In this thesis, we map that transformation. First, we chart the rise of AI-powered tools across five key areas visual inspection, electrical-signal diagnosis, energy prediction, self-driven cleaning, and intelligent optimization and distill dozens of studies into a clear thematic framework. Next, we pit each method against real-world metrics and highlight where lab successes stumble in dusty deserts or Europe's winter gloom. Finally, we show how hybrid and ensemble strategies with the best of computer vision, recurrent networks, and reinforcement controllers—are emerging as the next frontier, while also calling out the practical roadblocks: data standards that don't talk to one another, shifting ROI calculations, and the headache of plugging new AI brains into legacy inverters.

By weaving these threads together, this work doesn't just review the state of the art—it lays out a roadmap for bringing truly autonomous, end-to-end AI management to solar farms worldwide, ensuring cleaner power, less downtime, and a greener future.

Keywords— solar PV, artificial intelligence, computer vision, time-series forecasting, predictive maintenance, ensemble models, renewable-energy operations

Résumé

Les fermes solaires sont devenues des piliers de la transition mondiale vers les énergies propres, mais les exploiter à leur rendement maximal demeure un véritable casse-tête. Les inspections manuelles, les simples alarmes à seuil et les réparations après incident prédominent encore dans de nombreuses installations de grande envergure ; cette approche fait grimper les coûts et gaspille une production précieuse.

C'est là qu'intervient l'intelligence artificielle. En exploitant l'afflux continu de données issues de capteurs, de caméras et de prévisions météorologiques, les moteurs modernes d'IA et d'apprentissage automatique peuvent détecter les anomalies, prévoir la production d'énergie et même planifier la maintenance avant qu'un technicien n'intervienne. Qu'il s'agisse d'apprendre à des réseaux de neurones convolutionnels à repérer des micro-fissures sur des images électroluminescentes avec plus de 98% de précision, ou de déployer des modèles d'ensemble pour réussir à 99,98% des prévisions journalières, ces techniques révolutionnent l'exploitation des centrales photovoltaïques.

Dans ce mémoire, nous retracons cette transformation. Nous commençons par dresser un panorama des outils reposant sur l'IA dans cinq domaines clés : inspection visuelle, diagnostic des signaux électriques, prévision énergétique, nettoyage autonome et optimisation intelligente, puis nous structurons des dizaines d'études en un cadre thématique cohérent. Ensuite, nous confrontons chaque méthode à des indicateurs issus du terrain pour mettre en lumière les atouts et les limites rencontrées, qu'il s'agisse des déserts poussiéreux ou des hivers européens. Enfin, nous montrons comment les stratégies hybrides et d'ensemble alliant vision par ordinateur, réseaux récurrents et contrôleurs par renforcement ouvrent la voie à la prochaine génération d'outils, tout en soulignant les obstacles pratiques : normes de données non interopérables, calculs de retour sur investissement fluctuants et complexité d'intégration de nouvelles « cerveaux » IA dans des onduleurs existants.

En tissant ces éléments, ce travail ne se contente pas d'auditer l'état de l'art ; il trace une feuille de route pour déployer une gestion IA véritablement autonome et de bout en bout des fermes solaires à l'échelle mondiale, garantissant une énergie plus propre, une disponibilité accrue et un avenir plus vert.

Mots-clés—photovoltaïque, intelligence artificielle, vision par ordinateur, prévision de séries temporelles, maintenance prédictive, modèles d'ensemble, exploitation des énergies renouvelables

ملخص

أصبحت مزارع الطاقة الشمسية اليوم ركيزة أساسية في الانتقال العالمي نحو الطاقة النظيفة، غير أن تشغيلها بأعلى معدلات الكفاءة لا يزال يمثل تحدياً معقداً. فعمليات التفتيش اليدوي، وإنذارات العتبات البسيطة، والإصلاحات اللاحقة للعطل لا تزال سائدة في العديد من المنشآت الكبيرة، ما يرفع التكاليف ويهدر قدرًا بالغ الأهمية من الطاقة المنتجة.

هنا يبرز دور الذكاء الاصطناعي. فمن خلال الاستفادة من الكم الهائل من البيانات الصادرة عن أجهزة الاستشعار والكاميرات وتوقعات الطقس، يمكن لأنظمة الذكاء الاصطناعي ومحركات التعلم الآلي الحديثة اكتشاف المشكلات في الوقت الفعلي، والتنبؤ بكمية الطاقة المنتجة، وحتى جدولة الصيانة قبل تدخل الفرق الفنية. بدءًا من تدريب الشبكات العصبية الالتفافية على رصد الشقوق الدقيقة في صور الإشعاع الكهروضوئي بدقة تتجاوز 98%، ووصولاً إلى استخدام نماذج التجميع للتنبؤ اليومي بدقة تصل إلى 98.99%، تعمل هذه التقنيات على إعادة كتابة قواعد تشغيل المحطات الشمسية.

في هذه الأطروحة، نرسم خريطة هذا التحول. أولًا، نستعرض تطور الأدوات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في خمسة مجالات رئيسية: الفحص البصري، وتشخيص الإشارات الكهربائية، والتنبؤ بالطاقة، والتنظيف الذاتي، والتحسين الذكي، وننظم عشرات الدراسات ضمن إطار موضوعي متماسك. ثم نواجه كل منهجية ببيانات وأداء العالم الحقيقي لبيان نقاط القوة والضعف في البيئات الصحراوية والغربية الشتوية على حد سواء. وأخيرًا، نوضح كيف تفتح الاستراتيجيات الهجينة والتجميعية التي تجمع بين رؤية الحاسوب، والشبكات العصبية المتكررة، ومحركات التعزيز آفاقًا جديدة للتطوير، مع تسليط الضوء على العوائق العملية: معايير البيانات غير القابلة للتشغيل المتبادل، وتقلب حسابات العائد على الاستثمار، وصعوبة دمج "عقول" الذكاء الاصطناعي في العواكس التقليدية.

من خلال نسج هذه الخيوط معًا، لا يكتفي هذا العمل بعرض أحدث المستجدات فحسب، بل يقدم خارطة طريق لتمكين إدارة شاملة ومستقلة تعتمد على الذكاء الاصطناعي في مزارع الطاقة الشمسية حول العالم، مما يضمن طاقة أنظف، وتقليل فترات التوقف، ومستقبل أكثر اخضرارًا

الكلمات المفتاحية--- الألواح الشمسية الفوتوفولطية، الذكاء الاصطناعي، رؤية الحاسوب، التنبؤ بسلاسل زمنية، الصيانة التنبؤية، نماذج التجميع، تشغيل مصادر الطاقة المتجددة