

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا للإعلام الآلي، 08 ماي 1945، بسيدي بلعباس
Ecole Supérieure en Informatique -08 Mai 1945- Sidi Bel Abbès



Master's Thesis

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

Field of Study: **Computer Science**

Specialty: **Artificial Intelligence & Data Science (IASD)**

Theme

On-Board Learning-Based Scheduler with Vision-Based Look-Ahead for Agile Earth Observation

Presented by:

Mlle Sana Bensaid

Defended on: 07/07/2026

In front of the jury composed of:

Mme Allal Lamia

President

Mr Meziane Iftene

Supervisor

Mr Chaib Souleyman

Co-Supervisor

Mr Mohammed El Amin Larabi

Co-Supervisor

Mme Naib Rabiaa

Jury

Academic Year: 2025 / 2026

Abstract

Earth observation satellites in low Earth orbit typically execute imaging schedules computed on the ground six to twenty-four hours before overflight, making them unable to adapt to cloud cover encountered during the pass. This thesis provides a systematic, synthesis-oriented analysis of vision-based onboard scheduling architectures that combine forward-looking scout cameras with reinforcement learning policies.

We model the satellite imaging task as a sequential decision-making problem and compare four formulations: Markov Decision Processes, Semi-Markov Decision Processes, Partially Observable MDPs, and the RNN-SMDP hybrid. Our analysis demonstrates that the Semi-Markov Decision Process is the most practical default for agile missions, as variable inter-target slew times are intrinsic to orbital mechanics and cannot be correctly modelled by fixed-time-step approaches. We evaluate twelve or more reinforcement learning approaches across five algorithm families, including DQN, PPO, SAC, GNN-based methods, and hybrid behavioural-cloning-initialised variants, showing that PPO initialised with expert demonstrations achieves 98.67 percent of the MILP upper bound with 40 to 60 percent fewer training steps.

We further analyse the scout-primary two-sensor architecture, the accuracy-power trade-off across validated onboard cloud detection systems, and the hardware deployment pipeline for flight-qualified edge processors. The analysis reveals three fundamental cross-cutting design tensions and identifies ten specific, testable open research questions with a prioritised roadmap for 2025 to 2030. Recommendations are grounded throughout in the operational context of Algeria’s ALSAT-2 satellites and ASAL’s national disaster monitoring priorities, including wildfire and flood observation.

Keywords: Earth observation, satellite scheduling, onboard autonomy, reinforcement learning, cloud detection, semi-Markov decision process, CubeSat, edge AI.

Résumé

Les satellites d’observation de la Terre en orbite basse exécutent généralement des planifications calculées plusieurs heures avant le survol, ce qui les empêche de s’adapter à la couverture nuageuse rencontrée lors du passage. Ce mémoire propose une analyse systématique et synthétique des architectures de planification embarquées basées sur la vision, combinant des caméras d’exploration orientables et des politiques d’apprentissage par renforcement.

Nous modélisons la tâche de planification d’imagerie satellitaire comme un problème de décision séquentielle et comparons quatre formulations: les processus de décision markoviens, les processus semi-markoviens, les processus partiellement observables, et l’hybride RNN-SMDP. Notre analyse démontre que le processus semi-markovien est le choix par défaut le plus pratique pour les missions agiles, car les temps de pivotement variables entre cibles sont inhérents à la mécanique orbitale. Nous évaluons plus de douze approches d’apprentissage par renforcement et montrons que PPO initialisé par clonage comportemental atteint 98,67 pour cent de la borne supérieure MILP avec 40 à 60 pour cent d’étapes d’entraînement en moins.

Nous analysons également l’architecture à deux capteurs, le compromis précision-puissance des systèmes de détection nuageuse embarqués, et le pipeline de déploiement matériel. Nos recommandations sont ancrées dans le contexte opérationnel des satellites ALSAT-2 d’Algérie.

Mots-clés: Observation de la Terre, planification de satellites, autonomie embarquée, apprentissage par renforcement, détection de nuages, processus de décision semi-markovien.

ملخص

تُنفَّذ أقمار الاستشعار عن بُعد في المدار الأرضي المنخفض جداول التصوير المحسوبة على الأرض قبل ست إلى أربع وعشرين ساعة من التحليق، مما يجعلها عاجزةً عن التكيف مع الغطاء السحابي المُصادف أثناء المرور. يُقدِّم هذا البحث تحليلاً منهجياً وشاملاً للمماريات المدمجة لجدولة التصوير القائمة على الرؤية، والتي تجمع بين كاميرات استطلاع تطلع إلى الأمام وسياسات التعلم بالتعزيز.

نُصِّغ مهمة جدولة التصوير الفضائي على أنها مسألة اتخاذ قرار تسلسلي، ونقارن أربعة نماذج: عمليات القرار ماركوف، وعمليات القرار شبه ماركوف، وعمليات القرار ماركوف الجزئية الملاحظة، والنموذج الهجين RNN-SMDP. يُثبت تحليلنا أن عملية القرار شبه ماركوف هي الخيار الأمثل للمهمات الرشيفة، إذ إن أوقات الدوران المتغيرة بين الأهداف متأصلة في ميكانيكا المدار ولا يمكن نمذجتها بدقة بأساليب الخطوة الزمنية الثابتة. نُقيِّم اثني عشر نهجاً أو أكثر من التعلم بالتعزيز عبر خمس عائلات خوارزمية، تشمل DQN و PPO و SAC والأساليب القائمة على GNN والأنماط الهجينة المهيأة بالاستنساخ السلوكي، مُبينين أن PPO المهيأ بعروض الخبراء يحقق 98.67 بالمئة من الحد الأعلى ل MILP مع تقليص خطوات التدريب بنسبة 40 إلى 60 بالمئة.

نحلل كذلك معمارية المستشعرين المكوّنة من كاميرا استطلاع وكاميرا رئيسية، والمقايضة بين الدقة والطاقة في أنظمة الكشف السحابي المدمجة المُتحقّق منها، وخطوط أنابيب النشر العتادي لمعالجات الحافة المؤهلة للفضاء. يكشف التحليل عن ثلاثة توترات تصميمية جوهرية متقاطعة، ويحدّد عشرة أسئلة بحثية مفتوحة وقابلة للاختبار مع خارطة طريق ذات أولويات للفترة من 2025 إلى 2030. تستند التوصيات طوال البحث إلى السياق التشغيلي لأقمار ALSAT-2 الجزائرية وأولويات الوكالة الفضائية الجزائرية في رصد الكوارث، بما فيها رصد الحرائق والفيضانات.

الكلمات المفتاحية: الاستشعار عن بُعد، جدولة الأقمار الاصطناعية، الاستقلالية المدمجة، التعلم بالتعزيز، الكشف السحابي، عملية القرار شبه ماركوف، كيوبسات، الذكاء الاصطناعي على الحافة.