

الجزائرية الديمقراطية الشعبية الجمهورية

People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة العليا للإعلام الآلي - 08 ماي 1945 - بسبدي بلعباس

Higher School of Computer Science
– 08 May 1945 – Sidi Bel Abbès



THESIS

Submitted in fulfillment of the requirements for the degree of **Engineering**

Field: **Computer Science**

Specialty: **Artificial Intelligence and Data Science**

Topic

From Satellite Imagery to Actionable Intelligence:

A Multi-Hazard Detection and Disambiguation Framework for Post-Event Flood and
Landslide Assessment

Presented by:

- Ms. Hafssa AOUAICHIA
- Ms. Nassiba BELHOUARI

Defended on: **06/07/2026**

- Ms. DIF Nassima
- Mr. BENSLIMANE Sidi Mohammed
- Mr. IFTENE Meziane
- Ms. KLOUCHE Badia

Before the jury composed of:

- President of the Jury
- Supervisor
- Co-Supervisor
- Examiner

Academic Year: 2025 / 2026

Abstract

Extreme rainfall events trigger catastrophic floods and landslides, causing loss of life and extensive damage to infrastructure. Rapid post-event impact assessment is critical for emergency response, yet remains fundamentally challenged by cloud cover that systematically obscures optical satellite imagery at the very moment when spatial information is most urgently needed, and by the inherent difficulty of distinguishing between spectrally similar hazard phenomena such as turbid floodwater and wet debris flows. This project proposes MHIA-VLM (Multi-Hazard Impact Assessment Vision-Language Model), a novel system for post-event flood and landslide impact assessment that integrates Vision-Language Models with multi-source Earth Observation data. By fusing Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 optical imagery, DEM-derived terrain features, and ESA WorldCover land cover context across a 22-channel input representation, the system produces structured, GIS-ready situation outputs and automated situation reports (SITREPs). A modality-adaptive inference strategy ensures reliable performance under cloud cover by gracefully degrading to SAR-only configurations while explicitly communicating the associated increase in uncertainty—a confidence reduction from 0.984 to 0.670 observed empirically under SAR-only conditions. The system incorporates physics-informed geomorphic constraints derived from shallow water equations and slope stability physics to resolve ambiguities between visually similar phenomena. Evaluation on public benchmarks (Sen1Floods11, Landslide4Sense) achieves flood IoU of 0.787 and landslide IoU of 0.468 (0.542 in the best configuration), with a global calibration error ECE of 0.0091. The system is further validated on three real case studies in the Algiers metropolitan area, demonstrating its operational applicability in the Mediterranean Tell Atlas context.

Keywords: Flood mapping, Landslide detection, Vision-Language Models, Sentinel-1, Sentinel-2, Multi-source fusion, Physics-informed constraints, Disaster response, Earth Observation, Situation reports

Résumé

Les événements pluvieux extrêmes déclenchent des inondations et des glissements de terrain catastrophiques, causant des pertes humaines et des dégâts considérables aux infrastructures. L'évaluation rapide de l'impact post-événement est essentielle pour la réponse d'urgence, mais elle demeure fondamentalement entravée par la couverture nuageuse, qui obscurcit systématiquement l'imagerie optique satellitaire au moment même où l'information spatiale est la plus urgemment nécessaire, ainsi que par la difficulté intrinsèque à distinguer des phénomènes d'aléas spectralement similaires, tels que les eaux de crue turbides et les coulées de débris humides. Ce projet propose MHIA-VLM (Multi-Hazard Impact Assessment Vision-Language Model), un système novateur d'évaluation post-événement des impacts d'inondation et de glissement de terrain, intégrant des modèles vision-langage (Vision-Language Models) à des données d'observation de la Terre multi-sources. En fusionnant les données SAR de Sentinel-1, l'imagerie optique de Sentinel-2, des caractéristiques de terrain dérivées d'un MNT (DEM), et le contexte d'occupation du sol issu d'ESA World-Cover au sein d'une représentation d'entrée à 22 canaux, le système produit des sorties de situation structurées, prêtes pour les SIG, ainsi que des rapports de situation automatisés (SITREPs). Une stratégie d'inférence adaptative aux modalités garantit une performance fiable sous couverture nuageuse, en se repliant de manière progressive sur une configuration SAR seule tout en communiquant explicitement l'augmentation d'incertitude associée — une réduction de confiance de 0,984 à 0,670 observée empiriquement dans ces conditions. Le système intègre des contraintes géomorphologiques guidées par la physique, dérivées des équations des eaux peu profondes et de la physique de stabilité des pentes, afin de résoudre les ambiguïtés entre phénomènes visuellement similaires. L'évaluation sur des jeux de données publics de référence (Sen1Floods11, Landslide4Sense) atteint un IoU de 0,787 pour les inondations et de 0,4875 pour les glissements de terrain (0,542 dans la meilleure configuration), avec une erreur de calibration globale (ECE) de 0,0091. Le système est en outre validé sur trois études de cas réelles dans la région métropolitaine d'Alger, démontrant son applicabilité opérationnelle dans le contexte méditerranéen de l'Atlas tellien.

Mots-clés : Cartographie des inondations, Détection des glissements de terrain, Modèles vision-langage, Sentinel-1, Sentinel-2, Fusion multi-sources, Contraintes guidées par la physique, Réponse aux catastrophes, Observation de la Terre, Rapports de situation.

الملخص

تؤدي الظواهر المطرية المتطرفة إلى فيضانات وانزلاقات أرضية كارثية، مما يتسبب في خسائر بشرية وأضرار جسيمة للبنية التحتية. يعد التقييم السريع للأثر بعد الحدث أمراً بالغ الأهمية للاستجابة للطوارئ، إلا أنه يظل محدوداً بشكل أساسي بسبب الغطاء السحابي الذي يحجب صور الأقمار الصناعية البصرية في اللحظة التي تكون فيها المعلومات المكانية في أشد الحاجة إليها، وكذلك بسبب الصعوبة المتأصلة في التمييز بين ظواهر المخاطر المتشابهة طيفياً مثل مياه الفيضانات العكسة وتدفقات الحطام الرطبة.

يقترح هذا المشروع نظام MHIA-VLM (نموذج الرؤية-اللغة للتقييم متعدد المخاطر)، وهو نظام مبتكر لتقييم تأثير الفيضانات والانزلاقات الأرضية بعد الحدث، يدمج نماذج الرؤية-اللغة مع بيانات رصد الأرض متعددة المصادر. من خلال دمج صور الرادار SAR من Sentinel-1، والصور البصرية من Sentinel-2، وميزات التضاريس المستمدة من نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) وسياق الغطاء الأرضي من ESA WorldCover عبر تمثيل إدخال بـ 22 قناة، ينتج النظام مخرجات حالة منظمة وجاهزة للاستخدام في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بالإضافة إلى تقارير حالة آلية (SITREPs).

تضمن استراتيجية الاستدلال المتكيفة مع الوسائط أداءً موثقاً تحت الغطاء السحابي، من خلال التحلل التدريجي إلى تكوينات تعتمد على SAR فقط، مع الإبلاغ الصريح عن الزيادة المصاحبة في عدم اليقين - انخفاض الثقة من 984.0 إلى 670.0 تم رصده تجريبياً في ظل ظروف SAR فقط. يدمج النظام قيوداً جيومورفولوجية مسترشدة بالفيزياء، مستمدة من معادلات المياه الضحلة وفيزياء استقرار المنحدرات، لحل حالات الغموض بين الظواهر المتشابهة بصرياً.

يحقق التقييم على مجموعات البيانات المرجعية العامة (Sen1Floods11، Landslide4Sense) مؤشر IoU قدره 787.0 للفيضانات و 468.0 للانزلاقات الأرضية (542.0 في أفضل تكوين)، مع خطأ معيارية عالمي ECE قدره 0.0091. تم التحقق من صحة النظام أيضاً على ثلاث دراسات حالة حقيقية في منطقة العاصمة الجزائر، مما يثبت قابلية تطبيقه التشغيلي في سياق الأطلس التلي المتوسطي.

الكلمات المفتاحية: رسم خرائط الفيضانات، كشف الانزلاقات الأرضية، نماذج الرؤية-اللغة، Sentinel-1، Sentinel-2، الدمج متعدد المصادر، القيود المسترشدة بالفيزياء، الاستجابة للكوارث، رصد الأرض، تقارير الحالة.