

# La sentinelle numérique : l'intelligence artificielle géospatiale et la révolution médico-légale dans l'atténuation des risques géologiques

L'approche mondiale de la gestion des risques géologiques a atteint un point d'inflexion critique au début de l'année 2026, passant d'une réponse aux crises réactive à un paradigme d'intelligence numérique prédictive. Comme l'indique le reportage de référence de la BBC du 23 mars 2026, intitulé « L'IA qui avertit les populations des glissements de terrain et des avalanches », l'intégration de l'observation de la Terre à haute résolution avec l'intelligence artificielle (IA) de pointe a permis un degré de prévoyance auparavant jugé impossible. Ce changement n'est pas seulement technologique, il est existentiel. Rien qu'en 2025, les catastrophes naturelles ont infligé environ 296 milliards USD de coûts économiques directs, avec un « déficit de protection » — la part non assurée de ces pertes — restant obstinément élevé à 56 %, soit 167 milliards USD.<sup>1</sup> Pour les mouvements de masse géologiques tels que les glissements de terrain et les avalanches, qui font plus de 4 000 morts par an et causent environ 20 milliards USD de pertes mondiales directes, le déploiement d'une détection par IA à « l'échelle millimétrique » représente l'ultime frontière pour protéger à la fois la vie humaine et les 151 billions USD d'investissements dans les infrastructures prévus jusqu'en 2050.<sup>2</sup>

## Le mécanisme technologique : l'IA géospatiale et la fusion de capteurs

La transition vers l'IA prédictive dans la surveillance géologique repose sur la fusion de données de capteurs multimodaux, principalement le radar à synthèse d'ouverture (SAR), le SAR interférométrique (InSAR) et les réseaux sismiques terrestres. Contrairement aux capteurs optiques traditionnels, qui sont fréquemment aveuglés par la couverture nuageuse et les précipitations qui déclenchent les mouvements de masse, le SAR offre une capacité d'imagerie par tous les temps, de jour comme de nuit.<sup>5</sup>

### Déformation à l'échelle millimétrique et percées InSAR

La percée technique majeure de la période 2025-2026 réside dans le raffinement du traitement InSAR. L'InSAR fonctionne en mesurant la différence de phase entre deux ou plusieurs images SAR acquises à des moments différents au même endroit, ce qui permet de reconstruire des séries chronologiques de déplacement de surface avec une précision de l'ordre du millimètre.<sup>7</sup>

Cependant, les méthodes traditionnelles comme le PS-InSAR (Persistent Scatterer) et le SBAS-InSAR (Small Baseline Subset) ont souvent du mal dans les régions montagneuses en raison des pentes raides, de la végétation dense et de la faible cohérence interférométrique qui en résulte.<sup>5</sup>

Pour contourner ces limitations, la méthode SETP-EMI (Sequential Estimation and Total Power-Enhanced Expectation–Maximization) s'est imposée comme une voie technique dominante. Ce cadre, intégré dans une architecture DS-InSAR (Distributed Scatterer InSAR), améliore considérablement la stabilité de la phase et la continuité de la déformation. Dans des applications récentes dans le comté de Zhenxiong, en Chine, la méthode SETP-EMI a atteint un taux de détection de glissements de terrain de 94,1 %, générant 2,49 millions de points de mesure — une densité 22,5 fois supérieure à celle du PS-InSAR traditionnel.<sup>5</sup> Cette densité est cruciale pour identifier les glissements « actifs, très lents » et « actifs, extrêmement lents » qui précèdent une rupture catastrophique.<sup>5</sup>

## Architectures de réseaux neuronaux pour la prédiction spatiotemporelle

Le traitement de ces ensembles de données massifs repose de plus en plus sur des architectures d'apprentissage profond hybrides. Plus précisément, le modèle ResNet + Transformer a démontré des performances supérieures dans la prédiction spatiotemporelle.<sup>10</sup> Alors que les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) sont aptes à modéliser les motifs spatiaux locaux et les caractéristiques multi-échelles des champs de déformation, ils manquent du contexte global nécessaire pour une prédiction à long terme.<sup>10</sup> L'architecture Transformer, grâce à son mécanisme d'auto-attention, permet de modéliser des relations globales complexes sur l'ensemble de la série chronologique.<sup>10</sup>

Le fondement mathématique de ces prédictions implique souvent la modélisation du signal de phase enveloppé tout en évitant les erreurs inhérentes aux processus traditionnels de « déroulement ». Dans l'étude du glissement de terrain d'Achoma au Pérou, les chercheurs ont utilisé une approche basée sur la corrélation où un modèle de déformation est corrélé avec la série d'interférogrammes en utilisant la relation suivante<sup>8</sup> :

$$e^{i\delta\phi_{k,p}} = e^{iM_p\alpha_k}$$

où  $M_p$  représente la valeur de phase du modèle et  $\alpha_k$  est un coefficient de proportionnalité servant d'indice d'activité sans dimension. Cela permet d'identifier les phases d'accélération et les changements de régime jusqu'à trois mois avant la rupture, même lorsque les signaux InSAR traditionnels seraient perdus à cause de la décorrélation.<sup>8</sup>

Composant de l'IA	Fonction géospatiale principale	Impact sur la précision
ConvNeXt-InSAR	Filtrage du bruit de phase et évaluation de la qualité	Surpasse les indicateurs de cohérence traditionnels <sup>7</sup>
ResNet + Transformer	Prédiction de déformation spatiotemporelle	Meilleures performances (benchmarks RMSE/MAE) <sup>10</sup>
DS-InSAR (SETP-EMI)	Densité accrue des diffuseurs répartis	Densité de points de mesure multipliée par 22 <sup>5</sup>
Multimodal Dual-Path	Fusion InSAR et texture optique	Amélioration de 6 % du score F1 pour la détection <sup>11</sup>

## Reconnaissance de signatures sismiques et intelligence acoustique

Parallèlement à l'observation par satellite, on assiste à l'émergence d'une IA acoustique et sismique. L'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) en Suisse a développé un modèle d'IA qui « écoute » la montagne pour détecter les avalanches.<sup>12</sup> Ce système utilise des capteurs sismiques et d'infrasons installés dans le sol. Historiquement, ces systèmes étaient perturbés par de fausses alertes causées par des véhicules ou des hélicoptères. Le nouveau modèle d'IA, inspiré par l'architecture des grands modèles de langage (LLM), est entraîné pour reconnaître les « signatures sismiques » uniques des avalanches en reconstruisant les parties manquantes des signaux pour identifier les caractéristiques temps-fréquence.<sup>12</sup> Entraîné sur des enregistrements remontant à 1999, le système détecte plus de 90 % des signaux d'avalanches en temps réel, offrant ainsi aux autorités le délai nécessaire pour fermer des routes et évacuer des villages.<sup>12</sup>

## Les enjeux économiques et d'infrastructure

L'impact macroéconomique des mouvements de masse géologiques est considérable au regard de la fragilité des infrastructures mondiales. En avril 2026, les dépenses mondiales d'infrastructure devraient atteindre 6,9 billions USD par an d'ici 2050.<sup>2</sup> Les glissements de terrain et les avalanches agissent comme des « multiplicateurs de force » de perte économique, en particulier dans les secteurs des transports et de l'énergie.<sup>2</sup>

## Impact macroéconomique et déficit de protection

En 2025, les coûts économiques directs liés aux risques naturels mondiaux ont atteint 296 milliards USD.<sup>1</sup> Si les nations à revenu élevé peuvent souvent absorber ces coûts, les pays à

revenu intermédiaire souffrent de manière disproportionnée. En 2025, l'ouragan Melissa a entraîné des pertes dépassant **40** % du PIB de la Jamaïque.<sup>13</sup> Les glissements de terrain contribuent spécifiquement à une réduction de **1** % de la croissance du PIB sur quatre ans suivant un événement moyen, touchant principalement l'agriculture, les mines et la construction.<sup>14</sup>

## ROI de la maintenance prédictive basée sur l'IA

La justification financière des systèmes d'alerte précoce basés sur l'IA se trouve dans le retour sur investissement (ROI) de la maintenance prédictive (PdM). Dans les secteurs industriels et miniers, le coût moyen d'indisponibilité en 2026 est estimé à **260 000** USD par heure.<sup>15</sup>

Métrique	Maintenance traditionnelle	Maintenance prédictive IA (2026)	Source
Temps d'arrêt imprévu	Élevé (Réactif)	Réduction de 30 % à 50 %	15
Coûts de maintenance	Élevés (Gaspillage)	Réduction de 18 % à 25 %	15
Durée de vie des actifs	Remplacement prématuré	Extension de 20 % à 40 %	15
ROI documenté	N/A	10:1 à 30:1 en 18 mois	15

Dans le secteur minier, l'adoption de l'IA devrait améliorer l'efficacité opérationnelle jusqu'à **40** % d'ici 2026.<sup>19</sup> Les géants miniers comme BHP, Rio Tinto et Vale déploient des réseaux de capteurs pour surveiller les mouvements de roche, avec des gains de sécurité estimés entre **40** % et **60** %.<sup>19</sup> Le partenariat US-UE sur les minéraux critiques d'avril 2026 souligne que la fiabilité de l'infrastructure minière devient une prime structurelle indispensable.<sup>21</sup>

## Études de cas et déploiement dans le monde réel

L'efficacité de l'IA pour prédire les mouvements de masse est désormais démontrée par des déploiements concrets.

## Le glissement de terrain d'Achoma, Pérou (2025-2026)

Le glissement d'Achoma constitue une étude médico-légale majeure pour l'alerte précoce InSAR. En utilisant les données Sentinel-1, les chercheurs ont identifié une instabilité naissante dès cinq ans avant la rupture.<sup>8</sup> Un « rapport de cohérence » a révélé un changement de régime critique trois mois avant la rupture, le rapport chutant de 0,8 à 0,19, permettant d'identifier la formation d'une surface de cisaillement.<sup>8</sup>

## La sentinelle alpine suisse et le système himalayen

En Suisse, l'IA du WSL a réduit les fausses alertes d'avalanches de plus de 90%.<sup>12</sup>

Parallèlement, en Inde, un système indigène d'alerte précoce installé sur plus de 60 sites dans l'Himachal Pradesh fournit des alertes jusqu'à trois heures avant la rupture avec une précision de 90%.<sup>22</sup> Ce système utilise des capteurs à bas coût, démontrant que l'IA de haute performance peut être démocratisée par du matériel local accessible.<sup>22</sup>

## Acteurs clés et startups en 2026

- **Agences publiques** : L'ESA et la NASA restent les principaux fournisseurs de données SAR (via COMET-LiCSAR et EGIS).<sup>7</sup> L'OMM établit les normes pour les alertes précoces dans le cadre de l'initiative EW4All de l'ONU.<sup>24</sup>
- **Startups de la climat-technologie** :
  - **Beehive** (PDG Adriel Lubarsky) : Plateforme d'IA pour la préparation aux catastrophes et les rapports de risques climatiques.<sup>26</sup>
  - **Sensegrass** (PDG Lalit Gautam) : Capteurs de sol pour la surveillance des glissements de terrain et de la santé des cultures.<sup>27</sup>
  - **Magnefy** (PDG Joseph Kao) : IA et détection magnétique pour repérer les défauts électriques dans les infrastructures de surveillance.<sup>26</sup>
  - **Aikido Technologies** (PDG Sam Kanner) : Surveillance InSAR et inclinaison pour l'intégrité des infrastructures offshore flottantes.<sup>26</sup>

## La fracture numérique et l'inégalité de déploiement

La « fracture géopolitique des données » reste une préoccupation majeure en 2026. L'Inde génère un cinquième des données mondiales mais ne détient que 3% de la capacité mondiale des centres de données ; l'Afrique représente moins de 1% de cette capacité.<sup>29</sup>

Cette vulnérabilité est exacerbée par le manque de cartographie. Grâce au Microsoft AI for Good Lab, l'IA est utilisée pour cartographier chaque bâtiment dans des régions auparavant « invisibles ».<sup>30</sup> Cela alimente la carte EWCM (Early Warning Connectivity Map), qui identifie 173

millions de personnes inaccessibles par les alertes mobiles.<sup>25</sup> Pour combler ce fossé, la recherche s'oriente vers l'apprentissage auto-supervisé, permettant d'apprendre des modèles de signaux sans nécessiter d'ensembles de données étiquetés coûteux.<sup>31</sup>

## Conclusion : Vers l'ère de l'évaluation de l'IA

En mai 2026, l'IA est entrée dans une phase d'évaluation rigoureuse.<sup>33</sup> La transition vers « l'IA agentique » — des agents capables de surveiller les données et de déclencher indépendamment des alertes — représente la prochaine frontière technologique.<sup>34</sup> Bien que le mécanisme de prédiction soit mature, son déploiement reste une question d'équité en matière d'infrastructure.

### Perspectives stratégiques

1. **Fusion multimodale** : Prioriser la fusion InSAR/optique pour réduire les erreurs de classification de **6** %.<sup>11</sup>
2. **Souveraineté des données** : Développer des capacités de calcul locales dans les pays vulnérables.<sup>29</sup>
3. **IA explicable (XAI)** : Lutter contre la « fatigue des alertes » en fournissant des raisonnements clairs pour chaque alerte générée.<sup>35</sup>
4. **Standardisation** : Adopter le cadre de données de la Banque mondiale pour assurer l'interopérabilité des systèmes d'alerte.<sup>3</sup>

### Works cited

1. Natural Catastrophe and Climate Report - JANUARY 2026 - Gallagher, accessed on May 3, 2026, <https://www.ajg.com/gallagher/-/media/files/gallagher/gallagher/news-and-ights/2026/january/natural-catastrophe-and-climate-report-january-2026.pdf>
2. Global infrastructure spending to top \$150 trillion through 2050 | PwC, accessed on May 3, 2026, <https://www.pwc.com/gx/en/news-room/press-releases/2026/pwc-2026-global-infrastructure.html>
3. Publication: Toward a Standard for Landslide Data: Bridging Gaps in Landslide Susceptibility Modeling and Early Warning Systems - Open Knowledge Repository, accessed on May 3, 2026, <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/c1c63bce-6fe5-46ff-866d-e0a0d5b277b6>
4. DINOv3-Driven Semantic Segmentation for Landslide Mapping in Mountainous Regions, accessed on May 3, 2026, <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/2/406>
5. Enhanced Landslide Monitoring in Complex Mountain Terrain Using ..., accessed on May 3, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12846028/>
6. Review article: Deep learning for potential landslide identification: data, models, applications, challenges, and opportunities - NHSS, accessed on May 3, 2026,

- <https://nhess.copernicus.org/articles/26/487/2026/>
7. Deep Learning-Based Interferogram Quality Assessment and Application to Tectonic Deformation Study - MDPI, accessed on May 3, 2026, <https://www.mdpi.com/2072-4292/18/5/733>
  8. Beyond and beneath displacement time series: towards ... - NHES, accessed on May 3, 2026, <https://nhess.copernicus.org/articles/26/863/2026/>
  9. An SBAS-InSAR Analysis and Assessment of Landslide Deformation in the Loess Plateau, China - MDPI, accessed on May 3, 2026, <https://www.mdpi.com/2072-4292/18/3/411>
  10. Spatiotemporal Prediction of Ground Surface Deformation Using TPE-Optimized Deep Learning - MDPI, accessed on May 3, 2026, <https://www.mdpi.com/2072-4292/18/2/234>
  11. A Method for Detecting Slow-Moving Landslides Based on the Integration of Surface Deformation and Texture - MDPI, accessed on May 3, 2026, <https://www.mdpi.com/2072-4292/18/6/899>
  12. Swiss AI model 'listens' to the mountain to detect avalanches - SWI ..., accessed on May 3, 2026, <https://www.swissinfo.ch/eng/swiss-ai/swiss-ai-model-listens-to-the-mountain-to-detect-avalanches/90964574>
  13. 2026 Climate and catastrophe insight - PreventionWeb.net, accessed on May 3, 2026, <https://www.preventionweb.net/publication/documents-and-publications/2026-climate-and-catastrophe-insight>
  14. Macroeconomic impact of weather disasters: a global and sectoral analysis - IDEAS/RePEc, accessed on May 3, 2026, <https://ideas.repec.org/p/bis/biswps/1292.html>
  15. AI Predictive Maintenance ROI: Real Numbers from 2026, accessed on May 3, 2026, <https://oxmaint.com/article/ai-predictive-maintenance-roi-calculator>
  16. AI in Predictive Maintenance: What Actually Works in 2026 - Kanerika, accessed on May 3, 2026, <https://kanerika.com/blogs/ai-in-predictive-maintenance/>
  17. AI Predictive Maintenance for Government Infrastructure 2026, accessed on May 3, 2026, <https://oxmaint.com/industries/government/ai-predictive-maintenance-government-infrastructure-2026>
  18. (PDF) AI-Based Predictive Maintenance and Financial Impact Analysis in Infrastructure Systems - ResearchGate, accessed on May 3, 2026, [https://www.researchgate.net/publication/404159788\\_AI-Based\\_Predictive\\_Maintenance\\_and\\_Financial\\_Impact\\_Analysis\\_in\\_Infrastructure\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/404159788_AI-Based_Predictive_Maintenance_and_Financial_Impact_Analysis_in_Infrastructure_Systems)
  19. Artificial Intelligence in Mining: 7 Trends for 2026 - Farmonaut, accessed on May 3, 2026, <https://farmonaut.com/mining/artificial-intelligence-in-mining-7-trends-for-2026>
  20. AI in Mining and Natural Resources Market Research Report with Forecast 2026 to 2035, accessed on May 3, 2026, <https://www.insightaceanalytic.com/report/ai-in-mining-and-natural-resources-market/2751>

21. US-EU Critical Minerals Partnership: Reshaping Western Mining in 2026 - Discovery Alert, accessed on May 3, 2026, <https://discoveryalert.com.au/critical-minerals-western-mining-supply-chain-security-2026/>
22. AI and Climate Action in India - Press Release: Press Information Bureau, accessed on May 3, 2026, <https://www.pib.gov.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=2228662®=3&lang=1>
23. List of Accepted Papers - IGARSS 2026, accessed on May 3, 2026, [https://2026.ieeeigarss.org/papers/accepted\\_papers.php](https://2026.ieeeigarss.org/papers/accepted_papers.php)
24. Fostering global cooperation on AI for early warning systems - World Meteorological Organization WMO, accessed on May 3, 2026, <https://wmo.int/resources/meteoworld/meteoworld-april-2026/fostering-global-cooperation-ai-early-warning-systems>
25. Early Warnings for All initiative (EW4All): January 2026 updates - PreventionWeb.net, accessed on May 3, 2026, <https://www.preventionweb.net/news/early-warnings-all-initiative-ew4all-january-2026-updates>
26. 15 Climate tech startups to watch in 2026 | Trellis, accessed on May 3, 2026, <https://trellis.net/list/climate-tech-startups-to-watch-in-2026/>
27. 15 AI-Powered Climate Tech Startups to Watch - Viral Methods, accessed on May 3, 2026, <https://metodoviral.com/en/news/15-ai-powered-climate-tech-startups-to-watch/>
28. Career Advice | GRIT, accessed on May 3, 2026, <https://gritsearch.com/category/career-advice/>
29. From Divide to Delivery: How AI Can Serve the Global South - CSIS, accessed on May 3, 2026, <https://www.csis.org/analysis/divide-delivery-how-ai-can-serve-global-south>
30. AI for Early Warnings: Experts unite with calls to build resilience and protect development gains | UN Office for Partnerships, accessed on May 3, 2026, <https://unpartnerships.un.org/news/2025/ai-early-warnings-experts-unite-calls-build>
31. Time-Series Landslide Detection with Multi-Scale Satellite Data and Unsupervised Machine Learning - The Conference Exchange, accessed on May 3, 2026, <https://agu.confex.com/agu/agu25/meetingapp.cgi/Paper/1889428>
32. Preprints - NHESS, accessed on May 3, 2026, <https://nhess.copernicus.org/preprints/>
33. Stanford AI experts predict what will happen in 2026, accessed on May 3, 2026, <https://news.stanford.edu/stories/2025/12/stanford-ai-experts-predict-what-will-happen-in-2026>
34. The AI Avalanche: 7 Breakthroughs Redefining March 2026 - Switas Consultancy, accessed on May 3, 2026, <https://www.switas.com/articles/the-ai-avalanche-7-breakthroughs-redefining-march-2026>
35. Predictive Maintenance Trends & Features 2025 | UptimeAI, accessed on May 3,

2026, <https://www.uptimeai.com/resources/predictive-maintenance-trends-2025/>