Dynamique des crues d'origine glaciaire et paraglaciaire, du processus local à l'échelle régionale grâce à la sismologie environnementale.

Vers un système d'alerte précoce dans les régions faiblement instrumentées.

Les crues d'origine glaciaire et paraglaciaire sont aujourd'hui l'un des aléas naturels les plus destructeurs dans les régions de montagne, et leur fréquence comme leur intensité sont appelées à être modifiées sous l'effet du réchauffement climatique anthropique. Ces événements résultent de cascades de processus impliquant avalanches, glissements de terrain, effondrements glaciaires et écoulements multiphasiques, qui mobilisent et transfèrent rapidement de grandes quantités d'eau, de sédiments et d'énergie à l'échelle des bassins versants. Leur déclenchement se produit souvent dans des zones isolées, faiblement instrumentées, tandis que leurs impacts se manifestent loin en aval, exposant populations et infrastructures à des risques majeurs.

Malgré des avancées récentes, notre compréhension de ces crues repose majoritairement sur des cas d'étude isolés, observés dans des contextes bien instrumentés, reconstruits a posteriori, ou bien documentés par imagerie satellitaire. Ce cadre limite fortement notre capacité à appréhender la variabilité spatiale et temporelle des processus, ainsi qu'à généraliser les résultats à l'échelle régionale. C'est précisément ce passage à l'échelle qui constitue aujourd'hui le principal verrou scientifique et opérationnel pour la compréhension de la dynamique des crues d'origine glaciaire et paraglaciaire. Un tel cadre crée aussi une forte disparité dans les capacités d'adaptation entre les régions bien instrumentées du Nord Global et les régions moins bien instrumentées du Sud Global.

Mon projet repose sur l'hypothèse que l'analyse des signaux sismiques générés par ces crues permet de faire un tel passage à l'échelle. Les crues produisent, de leur déclenchement à leur impact, des ondes sismiques caractéristiques détectables à grande distance, parfois sur plusieurs centaines de kilomètres. L'étude de ces événements à travers le champ émergent de la sismologie environnementale ouvre la voie à une observation distribuée, fondée sur des réseaux de sismomètres installés en zones sûres, capables de suivre la dynamique des crues à l'échelle de vastes régions tout en gardant une très fine résolution temporelle. Toutefois, l'exploitation de ce potentiel est aujourd'hui limitée par la complexité et la polyphonie des signaux sismiques, leur dégradation avec la distance, et la variabilité des conditions de propagation et d'instrumentation.

Pour lever ces verrous, je propose un projet structuré autour de trois axes complémentaires. Le premier axe vise à développer des méthodes de détection, de classification et de caractérisation des signaux sismiques adaptées au passage à l'échelle régionale, en combinant de méthodes d'apprentissage automatique existantes afin de développer un transfert d'apprentissage entre des régions bien instrumentées vers des régions moins bien instrumentées. Le deuxième axe s'attache à relier les signatures sismiques observées aux propriétés physiques des phases de déclenchement et de propagation, en établissant des lois d'échelle entre les signaux sismiques et les caractéristiques des processus en jeu et en intégrant des modèles physiques existants de génération des ondes. Le troisième axe mobilise ces résultats pour analyser les conditions morpho-climatiques qui influencent le déclenchement et la propagation des crues d'origine glaciaire et paraglaciaire; ainsi que pour concevoir des configurations optimales de réseaux sismiques, en vue de systèmes d'alerte précoce régionaux dans des contextes vulnérables et à faible instrumentation. Dans un premier temps, j'appliquerai cette approche dans la région himalayenne du Népal en utilisant le massif du Mont Blanc comme domaine bien instrumenté, avant d'envisager une extension dans la partie andine du Pérou.

En articulant observations locales fines et analyse régionale distribuée, ce projet vise à dépasser le cadre des études ponctuelles pour proposer une vision intégrée de la caractérisation de la physique des processus des crues d'origine glaciaire et paraglaciaire à l'échelle des bassins versants. Il contribue ainsi à une meilleure compréhension des transferts rapides de matière dans la zone critique de montagne, tout en posant les bases scientifiques nécessaires au développement de dispositifs d'alerte précoce robustes et adaptés aux enjeux de l'adaptation au changement climatique.

Ugo Nanni