Gestion des géotopes en Suisse

Rapport technique: état des lieux et typologie



Action de nettoyage de la marmite glaciaire des Caillettes (VD). Photo: S. Martin

RELIEF interprètes du paysage

Géraldine Regolini

Simon Martin

Hélène Maret

Impressum

Auteurs

bureau Relief : G. Regolini, S. Martin, H. Maret

Encadrement

Cette étude a bénéficié de l'expertise scientifique des membres de la Commission suisse du géopatrimoine de la SCNAT

Eva Bächli-Bischof (GEOTEST AG)

Raymond Beutler (Vertretung KBNL)

Thomas Buckingham (Tektonikarena Sardona)

Thomas Burri (Naturhistorischen Museum Bern)

Luc Braillard (Université de Fribourg)

Markus Felber (Consulenze geologiche e ambientali SA)

Philipp Häuselmann (Institut suisse de spéléologie et de karstologie)

Christian Meyer (Universität Basel)

Jürg Meyer (rundumberge.ch)

Emmanuel Reynard (Université de Lausanne)

Yvonne Stampfli (Amt für Natur und Umwelt, Kanton Bern)

Remerciements

Nous remercions la SCNAT, l'Office fédéral de l'environnement et les cantons suivants pour le soutien financier à cette étude: BE, FR, GE, GL GR, JU, NE, NW, OW, SG, SO, SZ, VD, VS, ZG, ZH

Portée du document

Cette étude présente une évaluation de l'état de conservation des géotopes en Suisse sur la base des données disponibles, en mettant en évidence les principales menaces auxquelles ils sont exposés et en proposant une typologie pour caractériser leur état de conservation et leur niveau de menace. Elle constitue l'étape préparatoire pour une future publication SCNAT explorant les enjeux pratiques de gestion - protection et valorisation - des géotopes.

Table des matières

Zusammenfassung 4
Sintesi 6
Résumé 8
1. Introduction 10
1.1. Contexte et objectifs de l'étude 10
1.2. Démarche et méthodes de recherche 10
2. Etat de conservation et gestion des géotopes analysés 12
2.1. Caractéristiques principales des géotopes 12
2.2. Intégrité 14
2.3. Principales atteintes et menaces 15
2.4. Vulnérabilité 17
2.5. Mesures de gestion 17
3. Typologie(s) des géotopes 19
3.1. Démarche et classification des géotopes 19
3.2. Résultats des analyses bi-variées et en composante principale 19
3.3. Démarche de la classification hiérarchique ascendante 21
3.4. Typologie 1 (max. variables) 23
3.5. Typologie 2 (max. inventaires et individus) 29
3.6. Apports d'une typologie basée sur l'état de conservation et le besoin de protection 29
4. Comparaisons avec d'autres typologies 31
4.1. Typologies naturalistiques 31
4.2. Typologie fondée sur les services géosystémiques 31
5. Conclusions et perspectives 33
Bibliographie 34
Annexes 34

Zusammenfassung

Ausgangslage und Ziele der Studie

Geotope sind ein unersetzliches Naturerbe und wichtige Zeugnisse der geologischen Geschichte der Schweiz. Trotz ihrer scheinbaren Robustheit sind sie zahlreichen natürlichen und anthropogenen Einflüssen ausgesetzt, darunter Bautätigkeiten, Rohstoffabbau, das Sammeln von Mineralien und Fossilien, Freizeitnutzung sowie natürliche Prozesse wie Erosion, Verwitterung und Vegetationsentwicklung. Im Gegensatz zu anderen Naturdenkmäler können beschädigte oder zerstörte Geotope nicht wiederhergestellt werden, ohne ihren (geo-)wissenschaftlichen Wert zu verlieren.

Obwohl heute achtzehn Kantone über ein Inventar der Geotope von kantonaler Bedeutung verfügen, fehlte bisher ein gesamtschweizerischer Überblick über deren Erhaltungszustand, die wichtigsten Gefährdungen sowie die bestehenden Schutz- und Pflegemassnahmen. Ziel dieses Projekts ist es, die Kenntnisse zum Erhaltungszustand der Geotope zu vertiefen und den kantonalen Fachstellen Grundlagen für eine bessere Berücksichtigung der Geotope in der Raumplanung bereitzustellen. Das von der Schweizerischen Geo-Erbe-Kommission, mehreren Kantonen und dem Bund unterstützte Projekt soll die Herausforderungen des Geotopschutzes besser aufzeigen und praxisorientierte Empfehlungen für deren Erhaltung erarbeiten.

Was ist ein Geotop?

Geotope sind Orte, die von der Geschichte unseres Planeten zeugen. Ihre Untersuchung ermöglicht es, die Erdgeschichte zu rekonstruieren und die Entwicklung des Lebens, der Landschaften und des Klimas besser zu verstehen. Diese seltenen und wertvollen Objekte verdienen besonderen Schutz, damit auch zukünftige Generationen sie erforschen und aus ihrer Beobachtung Erkenntnisse gewinnen können.

Definition, verwendet im Rahmen der Revision des Inventars der Geotope von kantonaler Bedeutung des Kantons Waadt.

Erhaltungszustand und Management der Geotope in der Schweiz

Die Analyse zeigt insgesamt eine erfreuliche Situation. Der grösste Teil der inventarisierten Geotope befindet sich in einem guten Erhaltungszustand und ist nur gering gefährdet. Tatsächlich bedrohte Geotope machen lediglich einen kleinen Anteil der untersuchten Objekte aus. Dieses Ergebnis ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da bereits stark beeinträchtigte Geotope häufig nicht in Inventare aufgenommen oder zerstörte Geotope ausgemustert werden.

Die wichtigsten Belastungen stehen im Zusammenhang mit baulichen Eingriffen, der Nutzung natürlicher Ressourcen, der Vegetationsentwicklung sowie einzelnen natürlichen Prozessen. Besonders betroffen sind Felsaufschlüsse, ehemalige Steinbrüche sowie bestimmte geomorphologische Geotope in siedlungsnahen Gebieten.

Die Untersuchung zeigt zudem, dass spezifische Managementmassnahmen bisher nur begrenzt umgesetzt werden. Etwas mehr als ein Drittel der Geotope verfügt über gezielte Pflegemassnahmen, wobei Monitoring mit Abstand die häufigste Massnahme darstellt. Rechtlich verbindliche Schutzinstrumente sind noch seltener: Nur rund zehn Prozent der Geotope geniessen einen ausdrücklichen gesetzlichen Schutz, meist aufgrund anderer Natur- oder Landschaftswerte und nicht wegen ihres geologischen Wertes. Insgesamt wird deutlich, dass das Geoerbe in den heutigen Schutz- und Planungsinstrumenten noch unzureichend berücksichtigt wird.

Mehrwert der entwickelten Typologie

Ein zentrales Ergebnis der Studie ist die Entwicklung einer Typologie, die Geotope nicht nur anhand ihrer geologischen oder geomorphologischen Eigenschaften, sondern zusätzlich nach ihrem Erhaltungszustand und ihrem Gefährdungsgrad klassifiziert. Damit geht sie über bestehende, rein beschreibende Klassifikationen hinaus.

Dank dieser Typologie konnte erstmals ein Überblick über die Verteilung der Geotope in Bezug auf ihren Erhaltungszustand und ihren Gefährdungsgrad gewonnen werden. Die Ergebnisse zeigen insbesondere, dass ein grosser Teil der bewerteten Geotope gut erhalten und wenig gefährdet ist (Type 1,2 und 4), während ein kleinerer Anteil einen beeinträchtigten Erhaltungszustand und einen hohen Gefährdungsgrad aufweist. Diese Ergebnisse tragen somit zum Ziel der Studie bei, die Kenntnisse über den Erhaltungszustand des Geoerbes zu vertiefen, indem sie eine erste Einschätzung des Anteils jener Objekte ermöglichen, die potenziell Management- oder Schutzmassnahmen erfordern. Diese Tendenz muss jedoch anhand einer grösseren Stichprobe bestätigt werden, sobald zusätzliche Daten aus den kantonalen Inventaren verfügbar sind.

Auf operativer Ebene stellt diese Typologie für Kantone, die über die erforderlichen Datengrundlagen verfügen, ein Entscheidungsinstrument dar. Sie ermöglicht es, rasch jene Geotope zu identifizieren, die lediglich eine periodische Überprüfung erfordern, jene, bei denen ein aktives Management notwendig ist, sowie jene, für die vorrangige Schutzmassnahmen angezeigt sind. Damit bietet sie eine Grundlage für die Priorisierung von Massnahmen und die gezielte Ausrichtung der verfügbaren Ressourcen.

Für Kantone, die noch nicht über ausreichend detaillierte Datengrundlagen verfügen, wäre es sinnvoll, eine Methode zur raschen Einschätzung der Managementprioritäten zu entwickeln. Dies würde eine erste Priorisierung des Handlungsbedarfs ermöglichen, bis umfassendere Bewertungen vorliegen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Studie liefert erstmals eine kantonsübergreifende Übersicht über den Erhaltungszustand der Geotope. Sie zeigt, dass das Geoerbe insgesamt gut erhalten ist, gleichzeitig aber erhebliche Unterschiede im Management bestehen und spezifische rechtliche Schutzinstrumente noch wenig verbreitet sind. Zudem unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit, die kantonalen Datengrundlagen zu harmonisieren und zu vervollständigen, um künftig eine umfassende nationale Beurteilung zu ermöglichen.

In der zweiten Projektphase werden die wichtigsten Herausforderungen im Umgang mit Geotopen vertieft behandelt. Ziel ist es, Behörden und Fachpersonen eine praxisorientierte Grundlage für den Umgang mit Geotopen zu bieten. Anhand konkreter Beispiele sollen mögliche Gefährdungen, geeignete Schutz- und Managementmassnahmen sowie Möglichkeiten zur Inwertsetzung, insbesondere in den Bereichen Bildung und Geotourismus, aufgezeigt werden.

Sintesi

Contesto e obiettivi dello studio

I geotopi costituiscono un patrimonio naturale insostituibile che testimonia la storia geologica della Svizzera. Nonostante la loro apparente robustezza, sono sottoposti a numerose pressioni legate alle attività umane (attività edilizie, sfruttamento delle risorse, raccolta di minerali e fossili, frequentazione nel tempo libero), così come a processi naturali (erosione, sviluppo della vegetazione, degradazione dovuta agli agenti atmosferici). A differenza di altri ambienti naturali, un geotopo degradato o distrutto non può essere ripristinato senza perdere il proprio valore scientifico e patrimoniale.

Sebbene attualmente diciotto Cantoni dispongano di un inventario o di un elenco dei geotopi di importanza cantonale, finora a livello svizzero mancava una visione d'insieme del loro stato di conservazione, delle principali minacce a cui sono esposti e delle misure di gestione e di protezione attuate. L'obiettivo di questo progetto è quello di approfondire le conoscenze sullo stato di conservazione dei geotopi in Svizzera e di fornire alle autorità cantonali degli strumenti che ne facilitino la presa in considerazione nell'ambito della pianificazione del territorio. Questo progetto, sostenuto dalla Commissione svizzera per il geopatrimonio, da diversi Cantoni e dalla Confederazione, mira a comprendere meglio le sfide legate alla gestione dei geotopi e a elaborare raccomandazioni pratiche.

Che cos'è un geotopo?

I geotopi sono siti che testimoniano la storia del nostro pianeta. Il loro studio permette di ricostruire la storia della Terra e di comprendere meglio l'evoluzione della vita, del paesaggio e del clima. Questi siti rari e preziosi meritano di essere conservati affinché anche le generazioni future possano continuare a studiarli e a sviluppare nuove conoscenze grazie alla loro osservazione.

Definizione utilizzata per la revisione dell'inventario dei geotopi del Canton Vaud.

Stato di conservazione e gestione dei geotopi in Svizzera

L'analisi evidenzia una situazione complessivamente favorevole. La maggior parte dei geotopi censiti si trova infatti in un buon stato di conservazione ed è poco minacciata, mentre i geotopi effettivamente minacciati rappresentano una piccola percentuale degli oggetti esaminati. Questo dato deve tuttavia essere interpretato con cautela, poiché gli inventari generalmente non includono più i siti già fortemente degradati o distrutti.

Le principali pressioni individuate sono legate alle attività edilizie, allo sfruttamento delle risorse naturali, allo sviluppo della vegetazione e ad alcuni processi naturali. Le situazioni più preoccupanti riguardano soprattutto affioramenti rocciosi, cave in disuso e alcuni geotopi geomorfologici situati in prossimità di insediamenti.

Lo studio evidenzia inoltre che l'attuazione di misure di gestione è ancora limitata. Solo poco più di un terzo dei geotopi beneficia di una misura di gestione specifica; il monitoraggio è di gran lunga la misura più frequente. Le misure di protezione legislative sono ancora più rare: soltanto il 10% circa dei geotopi risulta esplicitamente protetto, nella maggior parte dei casi a causa della presenza di altri valori naturali o paesaggistici, piuttosto che delle caratteristiche geologiche del sito. Questi risultati evidenziano come il geopatrimonio sia ancora considerato in maniera insufficiente negli strumenti di protezione e di pianificazione del territorio.

Valore aggiunto della tipologia elaborata

Uno dei principali risultati del presente studio è lo sviluppo di una tipologia dei geotopi basata non soltanto sulle loro caratteristiche geologiche e geomorfologiche, ma anche sul loro stato di conservazione e di vulnerabilità. Questo approccio consente di superare le classificazioni tradizionali, che descrivono

essenzialmente le caratteristiche geologiche o geomorfologiche degli oggetti.

Grazie a questa tipologia è stato possibile ottenere una prima panoramica della distribuzione dei geotopi in funzione del loro stato di conservazione e della loro vulnerabilità. I risultati indicano, in particolare, che gran parte dei geotopi valutati si trova in un buon stato di conservazione ed è poco vulnerabile (tipi 1, 2 e 4), mentre una percentuale più ridotta presenta uno stato di conservazione compromesso e un'elevata vulnerabilità.

Questi risultati contribuiscono all'obiettivo dello studio di approfondire le conoscenze sullo stato di conservazione del geopatrimonio, fornendo una prima stima della percentuale di siti che potrebbero necessitare di misure di gestione o di protezione. Questa tendenza dovrà tuttavia essere confermata dall'analisi di un campione più ampio, man mano che saranno disponibili ulteriori dati provenienti dagli inventari cantonali.

Dal punto di vista operativo, questa tipologia costituisce uno strumento di supporto decisionale per i Cantoni che dispongono dei dati necessari. Essa permette di individuare rapidamente quali geotopi necessitano semplicemente di un monitoraggio, quali richiedono invece una gestione attiva e quali necessitano infine di misure di protezione prioritarie. Offre quindi una base per stabilire le priorità delle misure da intraprendere e orientare l'allocazione delle risorse disponibili.

Per i Cantoni che non dispongono ancora di dati sufficientemente dettagliati, sarebbe utile sviluppare un metodo di valutazione rapido delle priorità di gestione, che consenta di stabilire una prima gerarchia delle azioni prioritarie da intraprendere in attesa di valutazioni più approfondite.

Conclusioni e prospettive

Questo studio costituisce la prima valutazione a livello intercantonale dello stato di conservazione dei geotopi in Svizzera. Esso dimostra che il geopatrimonio è ancora complessivamente ben conservato, ma anche che la sua gestione rimane eterogenea e che gli strumenti legislativi specifici dedicati ai geotopi sono ancora poco sviluppati. I risultati sottolineano inoltre la necessità di completare e armonizzare i dati a livello cantonale, al fine di consentire, a lungo termine, una visione nazionale completa.

Nella seconda fase del progetto saranno approfondite le principali sfide legate alla gestione dei geotopi. L'obiettivo è quello di fornire alle autorità e ai professionisti una base pratica per una migliore considerazione dei geotopi nelle loro attività. Attraverso esempi concreti saranno illustrate le potenziali minacce, le misure di protezione e di gestione più appropriate, nonché le possibilità di valorizzazione, in particolare nei settori dell'educazione e del geoturismo.

Résumé

Contexte et objectifs de l'étude

Les géotopes constituent un patrimoine naturel irremplaçable, témoin de l'histoire géologique de la Suisse. Malgré leur apparente robustesse, ils sont soumis à de nombreuses pressions liées aux activités humaines (aménagements, exploitation des ressources, collecte de minéraux et de fossiles, fréquentation) ainsi qu'à des processus naturels (érosion, végétalisation, altération). Contrairement à d'autres milieux naturels, un géotope dégradé ou détruit ne peut être restauré sans perdre sa valeur scientifique et patrimoniale.

Bien que dix-huit cantons disposent aujourd'hui d'un inventaire ou d'une liste des géotopes d'importance cantonale, aucune vision d'ensemble n'existait jusqu'à présent sur leur état de conservation, les principales menaces auxquelles ils sont exposés ou les mesures de protection mises en œuvre. L'objectif de ce projet est d'affiner les connaissances sur l'état de conservation des géotopes en Suisse et de fournir aux autorités cantonales des outils facilitant leur prise en compte dans l'aménagement du territoire. Soutenu par la Commission suisse du géopatrimoine, plusieurs cantons et la Confédération, il vise à mieux comprendre les enjeux de gestion des géotopes et à élaborer des recommandations pratiques.

Qu'est-ce qu'un géotope?

Les géotopes sont des sites témoins de l'histoire de notre planète. Leur étude permet de reconstruire l'histoire de la Terre et comprendre l'évolution du monde vivant, des paysages et du climat. Ces sites rares et précieux méritent d'être conservés pour que les générations futures puissent continuer à les étudier et à apprendre de leur observation.

Définition utilisée pour la révision de l'inventaire des géotopes du canton VD.

État de conservation et gestion des géotopes en Suisse

L'analyse met en évidence une situation globalement favorable. La majorité des géotopes inventoriés est encore en bon état de conservation et peu menacée. Les géotopes réellement menacés représentent une faible proportion des objets étudiés, même si cette situation doit être interprétée avec prudence, les inventaires ne recensant généralement plus les sites déjà fortement dégradés ou détruits.

Les principales pressions identifiées sont liées aux aménagements, à l'exploitation des ressources, au développement de la végétation et à certains processus naturels. Les situations les plus préoccupantes concernent principalement des affleurements rocheux, d'anciennes carrières ou certains géotopes géomorphologiques situés dans des secteurs fortement urbanisés.

L'étude montre également que les mesures de gestion restent limitées. Seul un peu plus d'un tiers des géotopes bénéficie d'une mesure de gestion spécifique, le suivi (monitoring) étant de loin la mesure la plus fréquente. Les protections réglementaires sont encore plus rares : seuls environ 10 % des géotopes bénéficient d'un cadre juridique explicite, le plus souvent au titre d'autres valeurs naturelles ou paysagères plutôt que pour leurs qualités géologiques. Ces résultats mettent en évidence une prise en compte encore insuffisante du géopatrimoine dans les instruments de protection et d'aménagement du territoire.

Intérêt de la typologie élaborée

L'un des principaux résultats de l'étude est le développement d'une typologie des géotopes fondée non seulement sur leur nature, mais également sur leur état de conservation et leur niveau de menace. Cette approche permet de dépasser les classifications traditionnelles, qui décrivent essentiellement les caractéristiques géologiques ou géomorphologiques des objets.

Grâce à cette typologie, il a été possible d'obtenir une première vue d'ensemble de la distribution des géotopes selon leur état de conservation et leur niveau de menace. Les résultats indiquent notamment qu'une grande partie des géotopes évalués est bien conservée et peu menacée (type 1, 2 et 4), tandis qu'une proportion plus restreinte présente un état de conservation dégradé et un niveau de menace élevé. Ces résultats contribuent ainsi à l'objectif de l'étude d'affiner les connaissances sur l'état de conservation du géopatrimoine, en apportant une première estimation de la proportion d'objets susceptibles de nécessiter des mesures de gestion ou de protection. Cette tendance devra toutefois être confirmée à partir d'un échantillon plus large, à mesure que des données complémentaires issues des inventaires cantonaux seront disponibles.

Sur le plan opérationnel, cette typologie constitue un outil d'aide à la décision pour les cantons disposant des données nécessaires. Elle permet d'identifier rapidement les géotopes qui nécessitent simplement une surveillance, ceux qui doivent faire l'objet d'une gestion active et ceux qui requièrent des mesures de protection prioritaires. Elle offre ainsi une base pour hiérarchiser les interventions et orienter l'allocation des ressources.

Pour les cantons ne disposant pas encore de données suffisamment détaillées, il serait utile de développer une méthode d'évaluation rapide des priorités de gestion, afin de permettre une première hiérarchisation des besoins en attendant la réalisation d'évaluations plus complètes.

Conclusions et perspectives

Cette étude constitue la première évaluation d'ensemble de l'état de conservation des géotopes en Suisse. Elle montre que le géopatrimoine est encore globalement bien préservé, mais également que sa gestion demeure hétérogène et que les outils réglementaires spécifiquement dédiés aux géotopes restent peu développés. Les résultats soulignent aussi la nécessité d'améliorer la disponibilité et l'harmonisation des données cantonales afin de disposer, à terme, d'une vision réellement nationale.

Lors de la deuxième phase du projet, les principaux enjeux liés à la gestion des géotopes seront approfondis. L’objectif est de fournir aux autorités et aux professionnels une base pratique pour une meilleure prise en compte des géotopes dans leurs activités. Des exemples concrets permettront d’illustrer les menaces potentielles, les mesures de protection et de gestion appropriées, ainsi que les possibilités de valorisation, notamment dans les domaines de l’éducation et du géotourisme.

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs de l'étude

Bien que les géotopes semblent robustes par nature, nombre d'entre eux sont menacés par des influences humaines et naturelles : projets de construction, exploitation des ressources, collecte de minéraux et de fossiles, prélèvements scientifiques, développement de la végétation, altération, érosion, etc. Pour de nombreux géotopes, les différents usages du site ou de ses environs entraînent également des conflits d'intérêts. Or un géotope, témoin d'une histoire géologique longue, ne peut pas être renaturé ou reconstruit sans perdre ce qui fait sa valeur patrimoniale et scientifique.

En Suisse, dix-huit cantons disposent d'un inventaire ou d'une liste des géotopes d'importance cantonale. Toutefois, aucune synthèse nationale ne permet actuellement d'évaluer leur état de conservation, les atteintes les plus fréquentes, les menaces auxquelles ils sont exposés ou les mesures de gestion mises en œuvre. Cette lacune limite la prise en compte cohérente des géotopes dans l'aménagement du territoire.

L'objectif de ce projet, soutenu par la Commission suisse du géopatrimoine, plusieurs cantons et la Confédération, est d'acquérir de nouvelles connaissances sur l'état de conservation des géotopes et de les mettre à disposition des services cantonaux et bureaux d'études au travers d'un document présentant les principaux enjeux de leur gestion. Il vise ainsi à renforcer leur intégration dans les processus de planification et de gestion territoriale et à offrir un outil pratique de sensibilisation et d'aide à la décision.

Ce premier rapport résume les résultats des analyses menées afin de mieux connaître l'état des géotopes en Suisse. Il constitue la base factuelle du projet. Le document destiné aux praticiens, centré sur les enjeux de gestion et les recommandations opérationnelles, fera l'objet d'un second volume.

1.2. Démarche et méthodes de recherche

Préparation des données

Dans un premier temps, le contenu de tous les 18 inventaires / listes cantonaux disponibles en Suisse a été passé en revue pour identifier ceux recensant des informations par rapport à la thématique de recherche, à savoir les menaces, les atteintes et objectifs de protection. Seuls huit inventaires recensent un ou plusieurs de ces attributs sur les fiches des géotopes.

Les inventaires des cantons de Bâle-Campagne, Soleure et Zürich n'ont finalement pas été retenus car un seul de ces termes y figure et les données ne sont plus actuelles. Au moment de faire cet état des lieux, l'inventaire bernois était encore au début de son élaboration. En raison du manque de données disponibles à ce stade, il n'a pas été intégré à l'analyse. **L'analyse a donc porté sur quatre inventaires:** ceux des cantons de **Fribourg, Jura, Uri et Vaud** (Fig. 1).

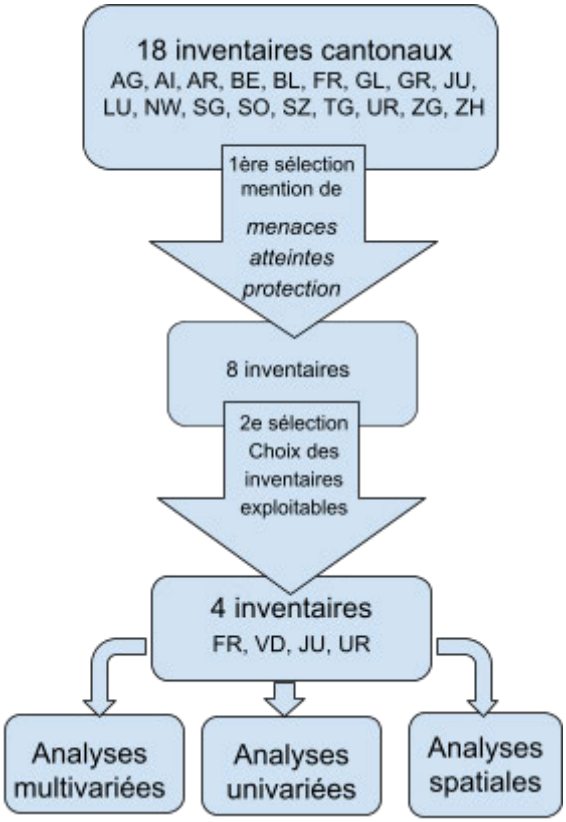


Figure 1 : Démarche de sélection et analyse des données.

Les données ont ensuite été compilées dans une base de données (voir Annexe 1). Certaines informations ont pu être récupérées directement ou recodées alors que d'autres n'étaient pas disponibles dans le même niveau de détail pour tous les inventaires. Finalement, des données spatiales ont été ajoutées pour chaque géotope. Ces dernières ont été soit reprises des inventaires (surface des géotopes), soit compilées automatiquement à partir du SIG (par exemple usage du sol, appartenance à une zone de protection d'importance fédérale). L'annexe 2 détaille la disponibilité des données selon chaque attribut et inventaire.

Analyses effectuées

Les analyses dont a fait l'objet cette étude sont de trois types:

- Analyses univariées: statistiques descriptives des différents attributs (Chapitre 2)
- Analyses bivariées: corrélations entre les différents attributs (Chapitre 3.2)
- Analyses multivariées: analyse factorielle en composante principale (ACP) et classification ascendante hiérarchique (CAH) (Chapitre 3.2-3.5)

Les détails méthodologiques ainsi que l'ensemble des résultats associés à ces analyses sont présentés dans les chapitres correspondants du rapport.

2. Etat de conservation et gestion des géotopes analysés

2.1. Caractéristiques principales des géotopes

Etat des données

Les géotopes analysés sont au nombre de 491, dont 103 dans le canton de Vaud, 92 dans le canton de Fribourg, 183 pour le canton du Jura (142 de l'inventaire géomorphologique et 41 de l'inventaire géologique) et 113 pour le canton d'Uri. Ils couvrent avant tout trois des six régions biogéographiques, à savoir le Jura, le Plateau et le versant nord des Alpes (Fig. 2).

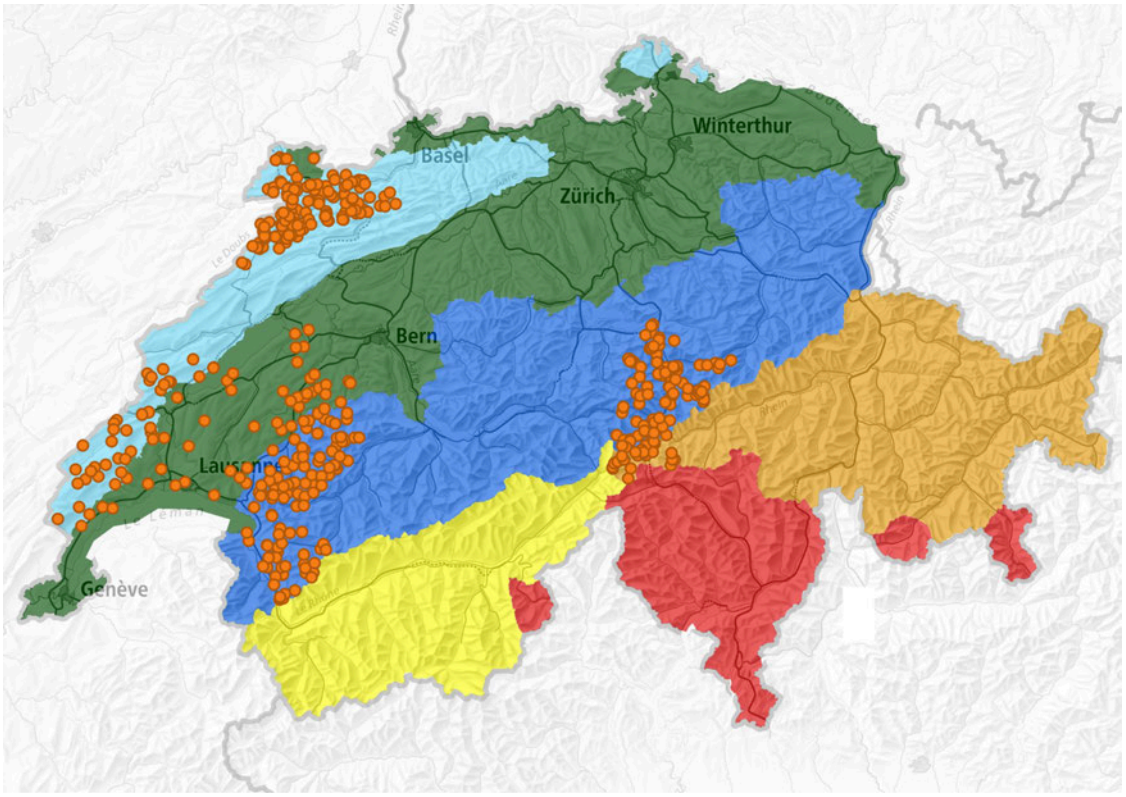


Figure. 2 : Carte de la répartition des géotopes analysés en détail selon les régions biogéographiques de la Suisse.

Les résultats présentés ci-dessous sont exprimés en pourcentage, rapportés au nombre d'individus (n) disponibles pour chaque critère. Pour chaque figure, la provenance des données est indiquée entre parenthèses.

Intérêt scientifique

Chaque géotope peut être caractérisé en fonction du domaine scientifique (paléontologie, sédimentologie, spéléologie, etc.) qui en constitue l'intérêt majeur. Sur l'ensemble des géotopes analysés, on constate que 330 (67%) sont classés dans la catégorie "géomorphologique". Loin derrière, avec 39 (8%) respectivement 31 (6%) objets, arrivent les géotopes paléontologiques suivis des géotopes stratigraphiques (Fig. 3).

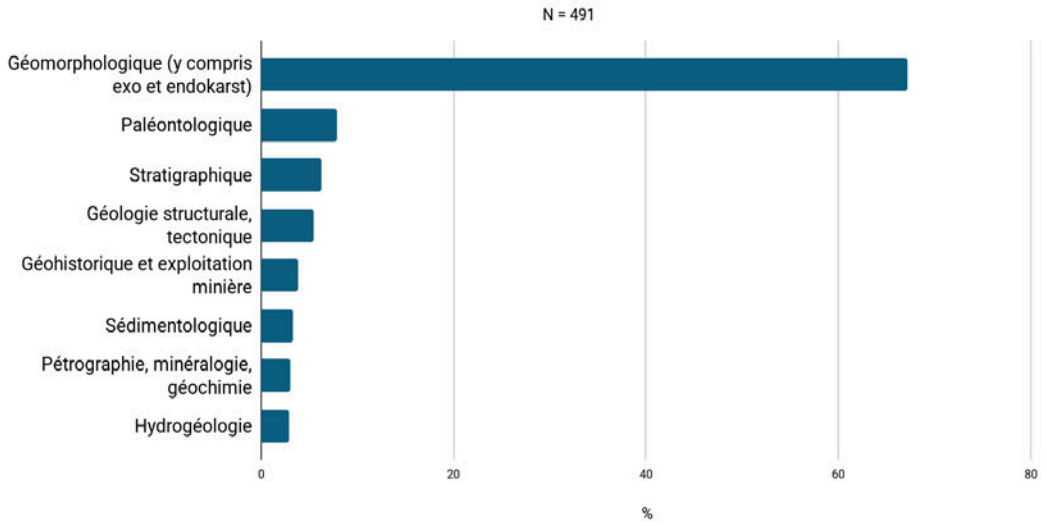


Fig. 3 : Répartition des géotopes par intérêt scientifique principal.

Des géologues ont souvent reproché à la liste des géotopes suisses une surreprésentation des géotopes géomorphologiques. Or, dans les quatre inventaires analysés ici, cette tendance se retrouve avec des parts comparables (VD: 50%, UR: 64%, FR: 66%, JU: 77%) de géotopes géomorphologiques. La forte présence de géotopes géomorphologiques s'explique principalement par leur abondance naturelle dans un pays de relief comme la Suisse qui en produit en grand nombre, variété et de bonne lisibilité et visibilité. À l'inverse, les géotopes géologiques couvrent plusieurs domaines spécialisés, ce qui peut accentuer le déséquilibre apparent entre les différentes catégories. Il n'en demeure pas moins que les géotopes géologiques sont souvent structurellement plus rares, ponctuels ou dépendants d'affleurements particuliers, parfois temporaires ou susceptibles de se dégrader avec le temps. Ces caractéristiques contribuent à expliquer la représentation proportionnellement plus élevée des géotopes géomorphologiques dans les inventaires cantonaux comme dans la liste nationale.

Origine et activité

L'attribut « origine » permet de distinguer les géotopes formés naturellement de ceux dont la mise en évidence résulte d'une intervention humaine. Les géotopes d'origine naturelle comprennent par exemple les moraines édifiées par le glacier du Valais et encore visibles aujourd'hui sur les rives du Léman. À l'inverse, certains affleurements ont été révélés ou rendus accessibles par des aménagements anthropiques, tels que des coupes routières, des carrières ou des travaux d'excavation.

L'attribut « activité » se réfère quant à lui au caractère actif ou non des processus géologiques ou géomorphologiques associés au géotope. Un géotope est considéré comme actif lorsque les processus qui l'ont formé sont encore en fonctionnement, comme dans le cas des systèmes torrentiels, des sources thermales ou des marges proglaciaires. Les géotopes passifs correspondent en revanche à des objets ou structures hérités, tels que des structures sédimentaires, des affleurements fossilifères ou des formes glaciaires stabilisées.

Ces deux attributs présentent un intérêt important pour la gestion et la conservation des géotopes. Les géotopes actifs nécessitent souvent une approche de gestion dynamique, visant à préserver le fonctionnement naturel des processus en cours et à limiter les perturbations susceptibles de les modifier. Les géotopes passifs requièrent davantage des mesures de protection contre les dégradations physiques ou la collecte non autorisée. De même, les géotopes d'origine anthropique peuvent demander un entretien spécifique afin de maintenir la visibilité et l'accessibilité des affleurements, par exemple dans le cas de la végétalisation naturelle d'une paroi ou de comblement artificiel. Ces interventions peuvent entrer en conflit avec d'autres objectifs de conservation de la nature ou du paysage et nécessitent donc une approche intégrée tenant compte des différents enjeux.

La grande majorité des géotopes inventoriés sont d'origine naturelle (414 objets, soit 92 %). Les géotopes passifs sont également majoritaires, avec 185 objets représentant environ 60 % des géotopes évalués selon cet attribut.

Origine	Nb	%
naturel	414	92
anthropique	36	8
Nb total	450	

Activité	Nb	%
passif	185	61
actif	120	39
Nb total	305	

Tab. 1 : Répartition des géotopes analysées selon leur origine et activité.

2.2. Intégrité

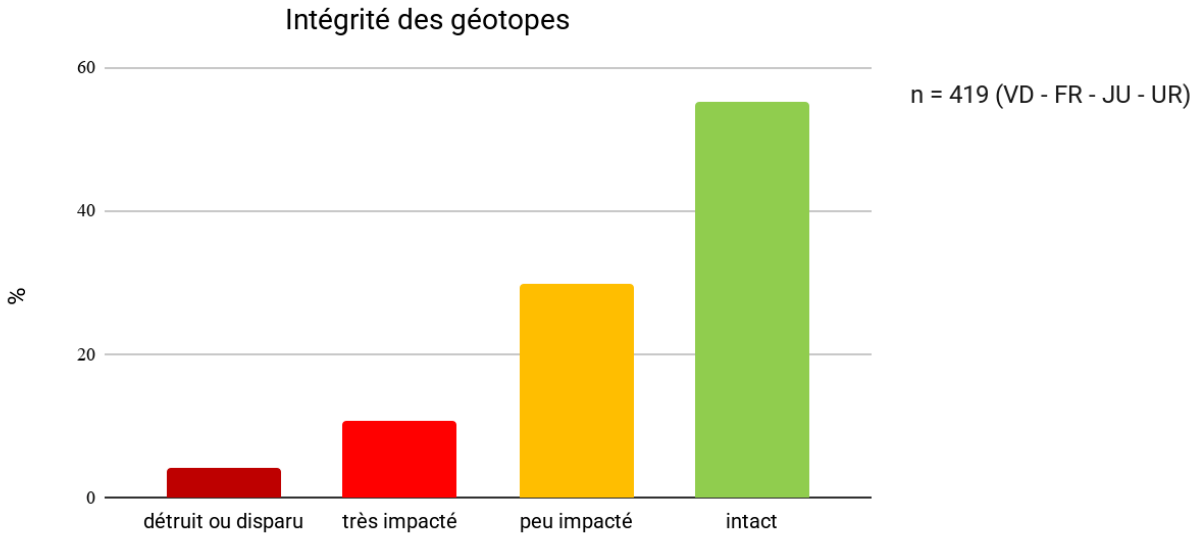


Fig. 4 : Répartition des géotopes par intégrité.

L'intégrité des géotopes se réfère à leur état de conservation ; elle est classée selon une échelle allant de «détruit ou disparu» pour les géotopes les plus fortement impactés à «intact» (Fig. 4). Ce critère était disponible pour l'ensemble des inventaires retenus (491 géotopes). La majorité des géotopes est intacte (55 %) ou peu impactée (30 %). Seule une minorité présente un état fortement dégradé (11 %) ou est détruite ou disparue (4 %).

Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence, car ils sont affectés par plusieurs biais de sélection.

D'une part, les géotopes déjà trop altérés ou considérés comme ayant perdu leur valeur géoscientifique ont généralement été exclus dès la phase de constitution des inventaires cantonaux, ce qui conduit mécaniquement à une surreprésentation des objets en bon état.

D'autre part, lors des révisions d'inventaires, certains géotopes peuvent être retirés parce qu'ils ont disparu ou ont été trop fortement impactés entre-temps. Dans le canton de Fribourg, par exemple, au moins sept blocs erratiques ont été perdus entre 1990 et 2022, ce qui a conduit à leur suppression lors des mises à jour de l'inventaire. Ce processus contribue également à sous-représenter les géotopes dégradés dans les données finales.

Dans le chapitre suivant, les différentes atteintes et menaces pesant sur les géotopes sont analysées en détail, afin de mieux comprendre les facteurs à l'origine de ces pertes et dégradations.

2.3. Principales atteintes et menaces

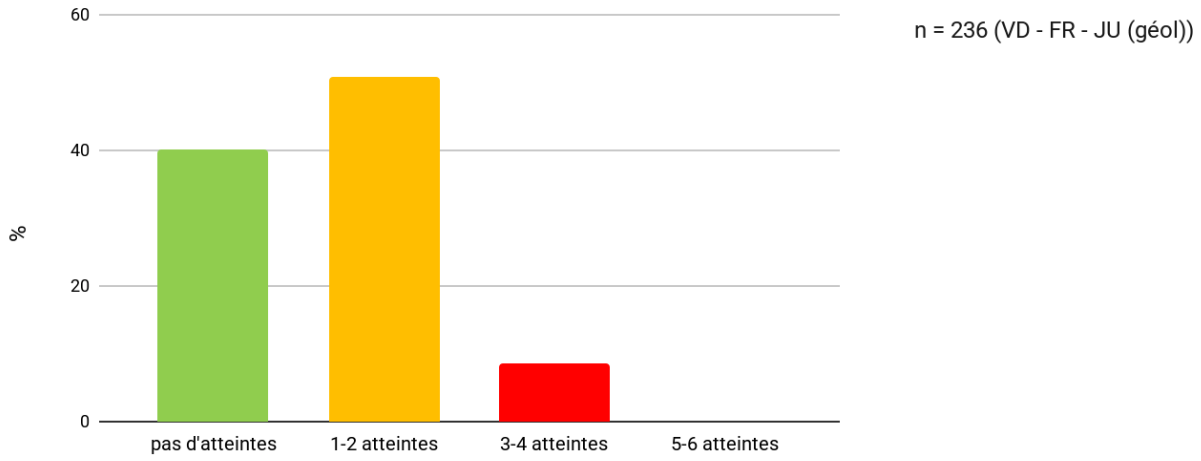


Fig. 5 : Répartition des géotopes par nombre d'atteintes.

Sur les 236 géotopes géologiques des cantons de Vaud, Fribourg et Jura, 40 % ne présentent aucune atteinte, tandis qu'environ 50 % montrent une ou deux atteintes. Moins de 10 % cumulent plus de trois atteintes, ce qui indique qu'une proportion non négligeable de géotopes est déjà soumise à plusieurs pressions simultanées (Fig. 5).

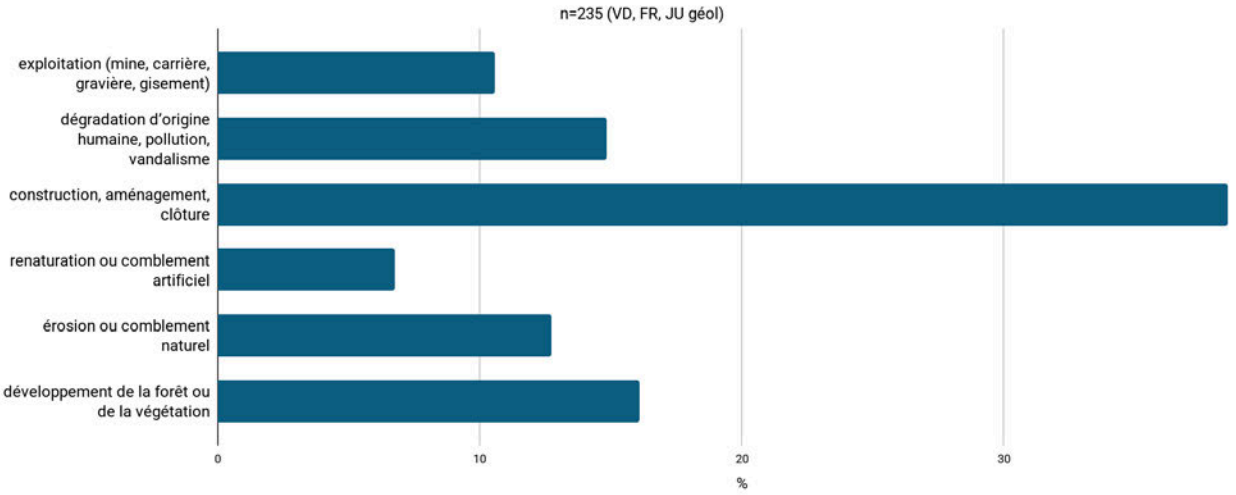


Fig. 6 : Fréquence des différents types d'atteintes.

Si l'on examine plus en détail la nature des atteintes, deux grands groupes se distinguent : les facteurs d'origine humaine et les facteurs naturels (Fig. 6).

Les atteintes anthropiques constituent la majorité des pressions exercées sur les géotopes. Les interventions liées à la construction, aux aménagements et aux clôtures représentent 39 % des cas, tandis que les dégradations d'origine humaine tels que la pollution ou le vandalisme comptent pour 15 %. L'exploitation (mine, carrière, gravière, gisement) contribue encore pour 11 %, ce qui porte la part totale des atteintes humaines à 65 %.

Les facteurs naturels jouent un rôle moindre mais significatif. Le développement de la forêt ou de la végétation représente 16 % des atteintes et l'érosion ou le comblement naturel concernent 13 % des géotopes. Les interventions de renaturation ou de comblement anthropique (7 %) se situent à l'interface entre processus naturels et actions humaines.

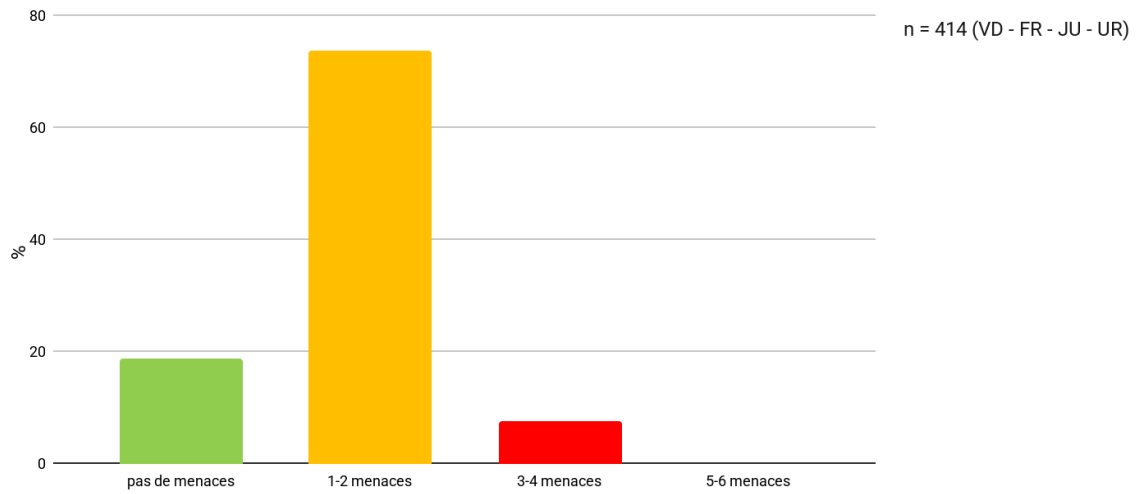


Fig. 7 : Répartition des géotopes par nombre de menaces.

Au-delà des atteintes déjà observées, il est également intéressant d'examiner les menaces susceptibles d'affecter les géotopes à l'avenir. L'analyse montre qu'une proportion relativement faible de géotopes — moins de 20 % des 414 objets évalués — ne fait face à aucune menace identifiée. La grande majorité, soit environ 75 %, est exposée à une à deux menaces, tandis que 7 % cumulent trois à quatre menaces, révélant des situations particulièrement sensibles où plusieurs facteurs de risque se superposent.

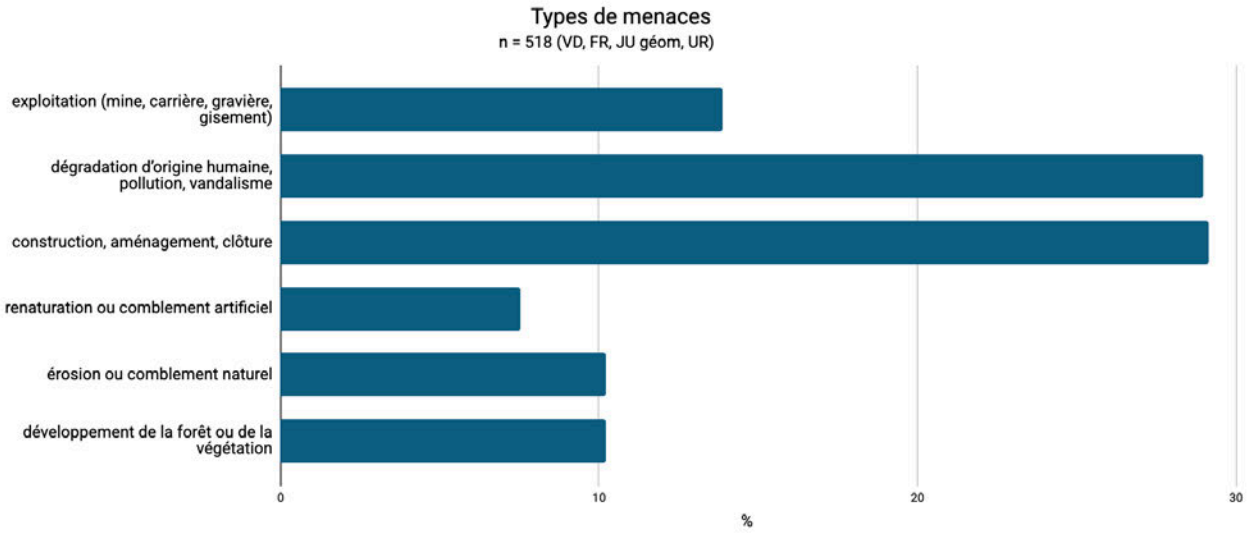


Fig. 8 : Types de menaces sur 414 géotopes mais 518 menaces (il y a des géotopes qui ont plusieurs menaces notées)

Sur les 518 menaces identifiées pour les 414 géotopes, les pressions sont dominées par des facteurs d'origine humaine. Les deux catégories les plus fréquentes sont les dégradations, pollutions et actes de vandalisme ainsi que les constructions et aménagements, qui représentent chacune 29 % des menaces. Du côté des facteurs naturels, les principales menaces sont le développement de la végétation et l'érosion ou le comblement naturel, qui comptent chacune pour 10 % du total.

Il convient toutefois de porter un regard critique sur ces résultats : les menaces sont présumées par les experts, tandis que les atteintes sont issues d'observations directes sur le terrain. Or, au vu du niveau réel de dégradations d'origine humaine constaté sur certains géotopes, il semble que les menaces anthropiques aient parfois été surestimées par rapport aux atteintes effectivement observées.

2.4. Vulnérabilité

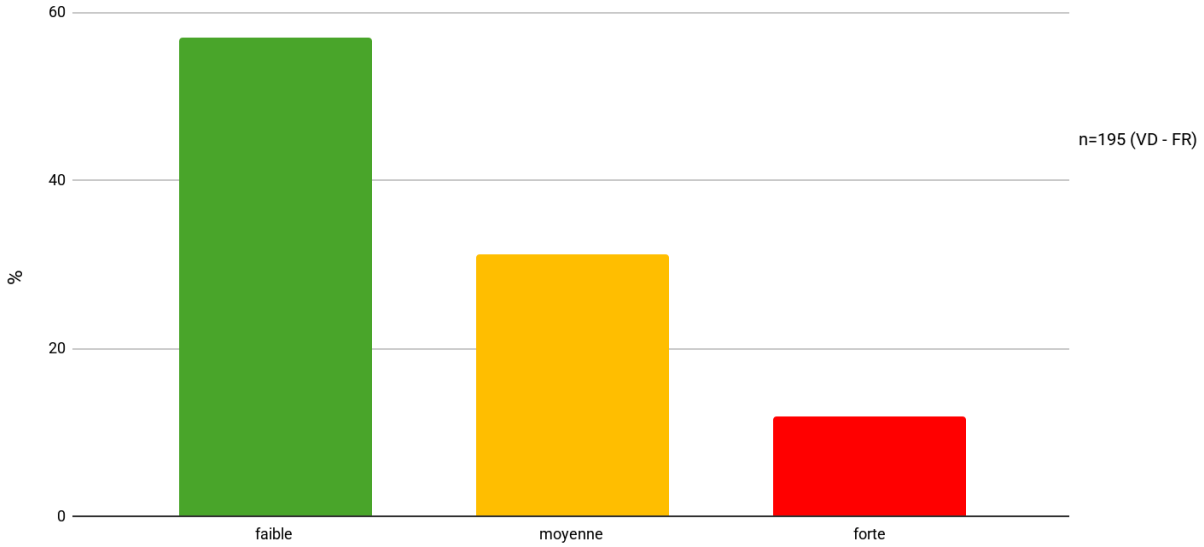


Fig. 9 : Répartition des géotopes vaudois et fribourgeois selon leur vulnérabilité.

La vulnérabilité a été évaluée pour les géotopes des cantons de Vaud et de Fribourg. Elle dépend à la fois de la fragilité intrinsèque de chaque géotope, du niveau de menace qui pèse sur lui et de son statut actuel de protection.

L'analyse met en évidence une répartition contrastée des niveaux de vulnérabilité. Sur les 195 géotopes évalués, la majorité présente une vulnérabilité faible (57%, soit 111 géotopes). Une proportion significative, 31 % (61 géotopes), se situe en vulnérabilité moyenne. Enfin, 23 géotopes, soit 12 %, sont classés en vulnérabilité forte, indiquant des situations où la fragilité de l'objet, la pression des menaces et l'absence ou l'insuffisance de mesures de protection se cumulent.

Ce critère de **vulnérabilité constitue un outil essentiel pour définir les priorités d'action**. Il permet d'identifier rapidement les géotopes nécessitant des efforts de gestion renforcés, qu'il s'agisse de mesures de protection formelles, d'interventions de stabilisation, de limitations d'usage ou d'une surveillance accrue. Les géotopes classés en vulnérabilité forte représentent ainsi un groupe prioritaire, pour lequel des actions ciblées peuvent prévenir des dégradations irréversibles et optimiser l'allocation des ressources de gestion.

2.5. Mesures de gestion

Les mesures recensées ont été **saisies selon deux catégories distinctes : les mesures de gestion et les mesures réglementaires**. Les premières regroupent l'ensemble des actions concrètes mises en œuvre pour entretenir, surveiller ou gérer l'accès aux géotopes, tandis que les secondes relèvent d'instruments juridiques formels encadrant leur protection.

L'analyse montre que 35 % des géotopes disposent d'au moins une mesure de gestion, ce qui reste relativement limité au regard des enjeux identifiés. Parmi les 337 mesures recensées, le monitoring constitue de loin l'action la plus fréquente, représentant 53 % du total. Cette surreprésentation s'explique par le fait que le monitoring est une mesure peu intrusive, simple à mettre en œuvre et mobilisant des ressources limitées. Il est souvent utilisé comme première réponse lorsqu'un géotope présente un enjeu, mais ne nécessite pas encore d'intervention lourde. Enfin, il reflète une logique de précaution, permettant de documenter l'évolution d'un site avant d'envisager des actions plus structurantes.

Il est par ailleurs intéressant de noter que cette forte présence du monitoring provient en grande partie des inventaires vaudois (67 sites monitorés sur 103) et jurassiens (112 sur 184). Dans le cas du canton de Vaud,

un géotope doit disposer d'au moins une mesure pour être intégré à l'inventaire. Lorsque aucune autre action n'est envisageable ou prioritaire, c'est alors le monitoring qui est systématiquement choisi, ce qui contribue à augmenter le poids dans les statistiques globales. Les autres mesures de gestion sont moins répandues (voir Fig. 10). Cette distribution montre que les mesures de gestion restent très inégalement réparties, avec une prédominance du monitoring et un recours encore limité à des actions plus structurantes comme l'entretien, la protection physique ou les contrats de gestion.

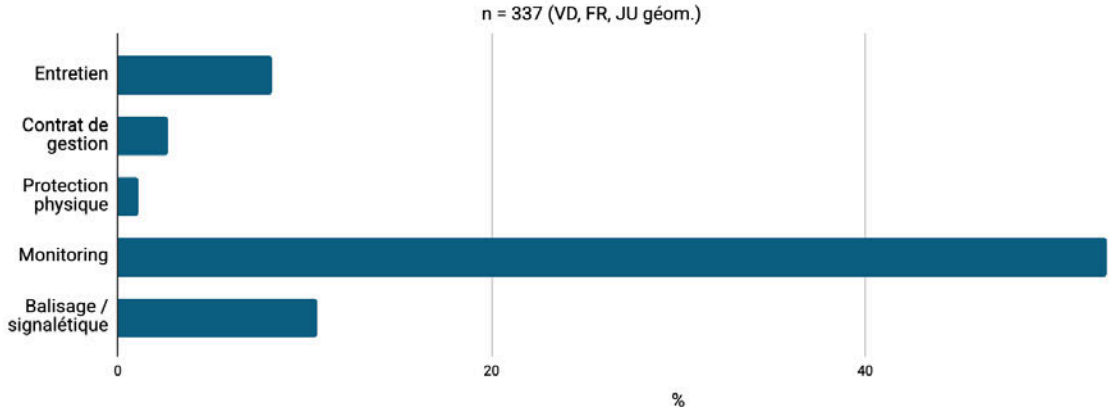


Fig. 10 : Fréquence des différentes mesures de gestion identifiées.

En parallèle des mesures de gestion, les mesures réglementaires constituent un autre pilier de la protection des géotopes. Elles correspondent à des **instruments juridiques** – protection légale à différentes échelles: communale, cantonale et fédérale, classement, inscription dans des plans d'affectation, etc. – qui encadrent l'utilisation du territoire.

L'analyse des données montre que les mesures réglementaires restent **peu fréquentes**. Sur les **449 informations disponibles**, seules **2 %** (10 sites) relèvent d'un dispositif **communal**, **4 % (16 sites)** d'un dispositif **cantonal** et **4 %** (18 sites) d'un dispositif **fédéral**. Ces proportions indiquent que **seuls 10 %** des géotopes bénéficient d'un cadre réglementaire explicite susceptible de contribuer à leur protection. Parmi ces 10 % de mesures, il s'agit le plus souvent d'une protection indirecte. Les périmètres protégés – qu'ils soient communaux, cantonaux ou fédéraux – sont généralement désignés sur la base d'autres critères, en particulier la **biodiversité et milieux naturels** (prairies sèches, sites de reproduction des batraciens, oiseaux migrateurs, réserves forestières, zones alluviales, réserves naturelles) ou le **paysage**, notamment via l'Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels (IFP). Le géotope se retrouve alors inclus, souvent aussi de manière fortuite, dans un périmètre protégé **sans que ses valeurs géologiques aient motivé la décision**.

Si l'on regarde de plus près, ces protections concernent **avant tout des géotopes géomorphologiques**, souvent de **grande ou moyenne extension** et présentant des **valeurs paysagères ou esthétiques** marquées (vallons, gorges, collines, éboulements). En revanche, les **sites de petite taille**, tels que les affleurements ou autres objets ponctuels, ne sont que très rarement couverts par ces dispositifs. Dans ces rares cas, il n'existe généralement **aucun lien direct** entre les objectifs du classement et les valeurs géologiques de l'objet, ce qui limite fortement la portée effective de la protection pour le géopatrimoine.

Ainsi, seuls **quelques cas isolés** témoignent d'une protection **directement fondée sur les caractéristiques géologiques** de l'objet (classement ou protection spécifique). Cette rareté souligne la **faible reconnaissance juridique** des géotopes en tant qu'éléments patrimoniaux à part entière, et met en évidence la nécessité de renforcer leur prise en compte dans les instruments d'aménagement du territoire.

3. Typologie(s) des géotopes

3.1. Démarche et classification des géotopes

Afin d'identifier d'examiner la possibilité de regrouper les géotopes selon une typologie fondée sur leurs besoins de protection, une série d'analyses statistiques exploratoires a été menée. Pour enrichir cette démarche, des attributs spatiaux ont été ajoutés au jeu de données des inventaires les plus complets (VD et FR), notamment la surface, l'usage du sol, l'altitude et le caractère urbain du contexte environnant, afin de vérifier leur contribution potentielle à la structuration des profils de géotopes.

L'analyse repose sur des approches bi- et multivariées (analyse des corrélations et e en composantes principales) visant à mettre en évidence les relations entre les différents attributs descriptifs des géotopes et d'identifier les gradients structurants qui sous-tendent les profils d'atteintes et de menaces. Enfin, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a permis de regrouper les géotopes selon des configurations similaires, ouvrant la voie à l'élaboration d'une typologie selon des besoins de protection.

3.2. Résultats des analyses bi-variées et en composante principale

Résultats de l'analyse de corrélations

L'analyse des corrélations de Pearson effectuées sur les données de VD et FR met en évidence quelques structures claires dans l'organisation des géotopes (Tab. 2 et Annexe 3). Les variables liées à la pression anthropique (nombre des atteintes, NBRE_ATT, et nombre des menaces, NBRE_MEN) présentent des corrélations positives avec la **vulnérabilité** (VULNERAB), indiquant que les sites les plus sollicités ou menacés sont également les plus vulnérables. À l'inverse, l'**intégrité** (INTEGRITE) est fortement et négativement corrélée à ces mêmes variables, ce qui montre que les géotopes les plus intègres sont moins exposés aux pressions. L'intégrité est également positivement associée à l'**altitude moyenne** (ALTIMOY), suggérant que les sites situés en altitude bénéficient d'une meilleure préservation, car moins exposés aux pressions. Les gradients altitudinaux jouent par ailleurs un rôle structurant : l'usage du sol (USAGESOL) varie fortement avec l'altitude, et l'urbanisation (URBAN) se concentre aux altitudes les plus basses. En revanche, certaines variables comme la **surface** (SURF) ou les **mesures de protection** (MESURES) ne montrent pas de relations significatives.

Dans l'ensemble, ces corrélations apparaissent **logiques et attendues** : moins de pressions en altitude, moins d'intégrité lorsque les atteintes et menaces augmentent, et une variation de l'usage du sol en fonction du relief. Elles confirment des structures territoriales bien connues, mais ne révèlent pas de **patterns cachés** ou de relations inattendues. Leur apport reste donc essentiellement descriptif, sans fournir d'éléments nouveaux pour une typologie fondée sur des interactions plus complexes.

Relation	Coefficient r	Interprétation
INTEGRITE ↔ NBRE_ATT	−0.45	Les géotopes intègres subissent moins d'activités humaines
INTEGRITE ↔ VULNERAB	−0.45	Les sites les plus intègres sont les moins vulnérables
INTEGRITE ↔ ALTIMOY	0.37	Les sites en altitude présentent une meilleure intégrité
NBRE_ATT ↔ VULNERAB	0.49	Plus d'activités → plus grande vulnérabilité
NBRE_MEN ↔ VULNERAB	0.35	Plus de menaces → plus grande vulnérabilité
USAGESOL ↔ ALTIMOY	0.50	Variation de l'usage du sol selon l'altitude
URBAN ↔ ALTIMOY	−0.41	L'urbanisation se concentre aux altitudes les plus basses

Tab. 2 : Corrélations les plus significatives entre les attributs analysés.

Résultats de l'analyse en composante principale (ACP)

Une ACP met en évidence les dimensions principales structurant les données, mais dans le cas des géotopes vaudois et fribourgeois analysés la contribution cumulée des quatre premières dimensions est limitée (38 % de la variance) (Fig. 11, Annexe 4), ce qui réduit la capacité du modèle à révéler des structures profondes.

CP1 représente la dimension dominante et regroupe les variables liées aux **atteintes**, aux **menaces** et à l'ensemble des **mesures de gestion** (charges entre 0.36 et 0.40). Cette composante traduit un axe cohérent où une **forte pression anthropique** s'accompagne d'une **réponse institutionnelle accrue**.

CP2 correspond à un **gradient environnemental**, opposant les géotopes **urbanisés et de basse altitude** (charges négatives sur ALTIMOY, URBAN, USAGESOL) aux géotopes **naturels situés en altitude**. Elle reflète la structuration territoriale classique entre milieux anthropisés et milieux naturels.

CP3 regroupe l'**intégrité** et la **vulnérabilité intrinsèque** (charges de 0.22). Cette composante exprime l'état propre du géotope et sa sensibilité aux perturbations, indépendamment des pressions externes.

CP4 rassemble des variables liées à l'**origine géologique**, à l'**activité** et à l'**intérêt scientifique** du site (charges de 0.22). Elle reflète les caractéristiques fondamentales des géotopes, distinctes des pressions ou du contexte spatial.

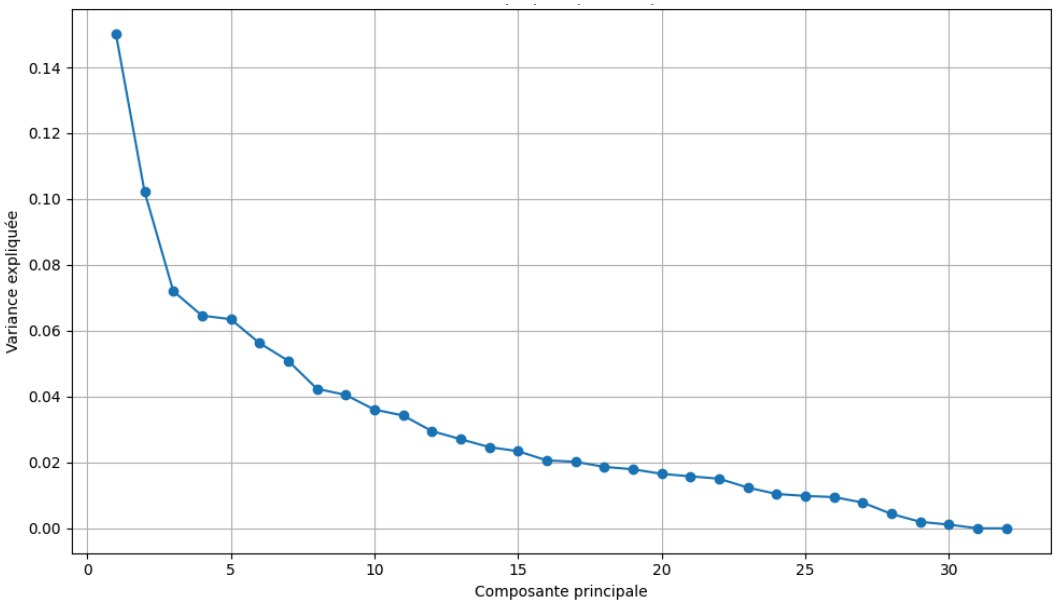


Fig. 11 : Scree plot de l'analyse en composante principale.

Les résultats de l'ACP montrent des axes interprétables mais une variance expliquée limitée, ce qui ne permet pas d'identifier des structures latentes suffisamment marquées pour soutenir une typologie robuste. Dans ce contexte, et compte tenu du caractère diffus des relations entre variables, il est nécessaire de revenir aux **données de base** pour examiner directement les profils des géotopes. L'analyse par **classification ascendante hiérarchique (CAH)** constitue ainsi l'étape suivante, afin de tester la formation éventuelle de groupes cohérents à partir des attributs initiaux, indépendamment des contraintes imposées par la réduction dimensionnelle.

3.3. Démarche de la classification hiérarchique ascendante

Afin d'élaborer une typologie des géotopes, la méthode de la classification ascendante hiérarchique (CAH) a été utilisée. Elle permet d'obtenir, à partir d'une série de critères, le regroupement d'individus similaires dans des classes homogènes. L'analyse des profils de chaque classe permet ensuite la caractérisation des groupes les uns par rapport aux autres.

La CAH se base sur le jeu de données initial avec une différence. Puisqu'il n'est pas possible d'effectuer une CAH sur des objets avec des données manquantes, des géotopes ont dû être éliminés en amont des calculs.

Deux approches complémentaires de sélection des données ont été appliquées: 1) maximiser le nombre de critères différents, au détriment du nombre de géotopes, et 2) intégrer un maximum d'inventaires (et donc de géotopes), mais perdre en qualité d'information puisque seuls quelques attributs se retrouvent dans tous les inventaires.

Les premiers tests de classification ascendante hiérarchique (CAH) ont été réalisés en intégrant les **attributs spatiaux** (surface, usage du sol, altitude, caractère urbain). Toutefois, ces variables ne se sont pas révélées explicatives pour la formation des groupes : les dendrogrammes obtenus ne montraient aucune structuration des géotopes en fonction de ces critères, et les regroupements restaient similaires, que les données spatiales soient incluses ou non. Autrement dit, ces attributs n'apportent aucune capacité discriminante permettant de caractériser ou différencier les groupes. Ils ont donc été écartés dès cette étape.

Parallèlement, l'inclusion des critères détaillant chaque type **d'atteinte et de menace** s'est révélée problématique. Le nombre élevé de variables (jusqu'à 25) produisait des groupes peu différenciés et difficiles à

caractériser, rendant la typologie peu robuste. Pour éviter ces effets de dispersion, il a été décidé de simplifier le jeu de données en se basant uniquement sur des indicateurs synthétiques : le nombre total d'atteintes et le nombre total de menaces (Tab. 3).

	Typologie 1 (max critères)	**Typologie 2 (max inventaires)**
Nombre de critères	7	4
Critères	origine, activité, intérêt scientifique, intégrité, nombre d'atteintes, nombre de menaces, vulnérabilité	intérêt scientifique, intégrité, nombre de menaces, mesures
Inventaires pris en compte	VD, FR	VD, FR, JU (géom), UR
Nombre de géotopes	192	369

Tab. 3 : Tableau synthétique des données utilisées pour les classifications hiérarchiques ascendantes.

Les résultats de la CAH sont représentés au moyen d'un arbre de classification (ou dendrogramme) montrant la hiérarchisation des groupes. Le choix du nombre de groupes à retenir revient à l'auteur et découle d'un compromis permettant une distinction à la fois claire et nuancée des groupes.

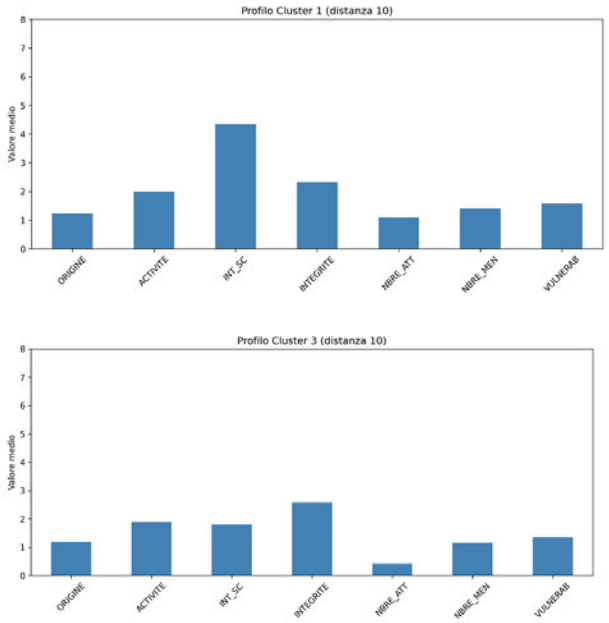
Les caractéristiques de chaque groupe ont été mises en évidence en élaborant leur profil. La description des traits communs à l'intérieur des groupes et des critères les distinguant des autres groupes permet de proposer une nomenclature pour chaque groupe. Elle reflète le type de géotope et son état de conservation ou son exposition aux menaces. Les groupes des deux typologies sont décrits dans les chapitres suivants.

3.4. Typologie 1 (max. variables)

Sur la base du dendrogramme issu du jeu de données regroupant le maximum de critères, une classification en 6 groupes a été retenue (voir Annexe 5). Comme les types 1 et 2 se distinguent principalement par la nature de leur intérêt scientifique et se ressemblent fortement sur les autres points, il a décidé de les regrouper et présenter ensemble.

Description des différents types

Type 1 et 2: Géotopes géologiques en bon état de conservation et peu menacés



Origine: naturelle
Activité: passif
Intérêts scientifiques principaux: T1: paléontologique et tectonique-structurale, T2 : stratigraphique, sédimentologique, pétrographique
Intégrité: en bon état de conservation
Atteintes: peu
Menaces: peu
Vulnérabilité: faible
N= T1: 24, T2: 31
Intrus: 0-6 selon les types et attributs[1]



Synclinal perché du Moléson (FR)

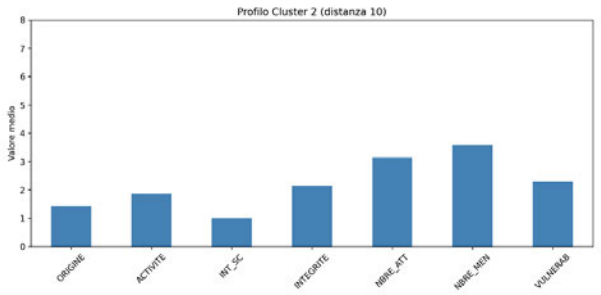


Affleurement de couches à mytilus des Rochers des Rayes (VD)

Ce groupe se caractérise par la présence de 55 géotopes en bon état de conservation et peu exposés aux atteintes et menaces. Leur vulnérabilité généralement faible reflète la stabilité des conditions naturelles et l'absence de pressions significatives. Ils constituent 88 % des géotopes géologiques, témoignant de la prédominance de ces objets bien conservés et faiblement menacés au sein du géopatrimoine.

[1] Sachant que les groupes ne sont jamais parfaitement homogènes, les individus présentant un écart de deux points par rapport à la médiane du groupe ont été considérés comme des intrus dans le décompte.

Type 3: Géotopes géologiques impactés et menacés



Origine: naturelle et artificielle
Activité: passif
Intérêt scientifique principal: stratigraphique
Intégrité: impacté
Atteintes: beaucoup
Menaces: beaucoup
Vulnérabilité: fort
N= 7
Intrus: 0-2 selon attributs



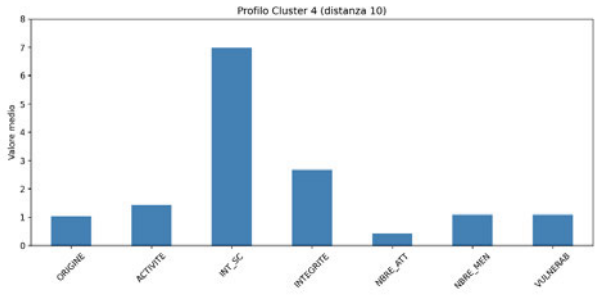
Affleurements de molasse subalpine en Lavaux (VD)



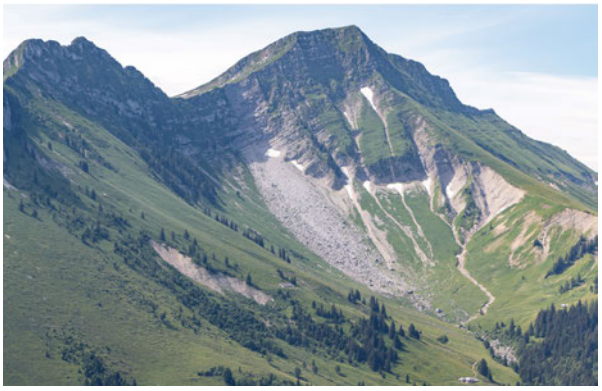
Affleurements de molasse à vertébrés de la Chaux (VD)

Ce groupe réunit sept géotopes d'origine à la fois naturelle ou artificielle (coupes de routes), présentant un intérêt scientifique principalement stratigraphique. Leur intégrité est déjà impactée, avec de nombreuses atteintes et menaces. La vulnérabilité de ces géotopes, principalement des affleurements, est jugée élevée en raison de leur fragilité intrinsèque (érosion naturelle) et exposition aux pressions naturelles (végétalisation) et anthropiques (aménagements).

Type 4: Géotopes géomorphologiques en bon état de conservation et peu menacés



Origine: naturelle
Activité: passif et actif
Intérêts scientifiques principaux: géomorphologique et hydrogéologique
Intégrité: inact
Atteintes: peu
Menaces: peu
Vulnérabilité: faible
N= 60
Intrus: 0-2 selon attributs



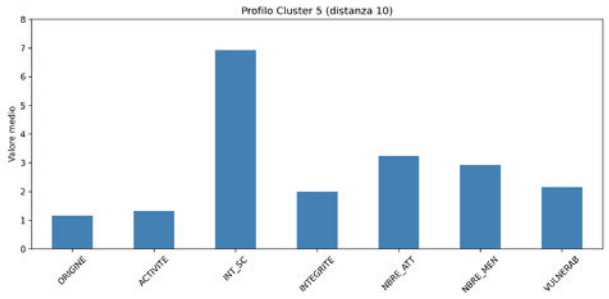
Eboulement de la Dent de Lys (FR)



Ouvalas et lapiaz de l'Aurore (VD)

Ce groupe, le plus nombreux avec 60 géotopes, rassemble des objets d'origine naturelle. Leur intérêt scientifique est principalement géomorphologique, incluant toutefois quelques géotopes hydrogéologiques (exsurgences). Leur intégrité est globalement intacte, avec peu d'atteintes et peu de menaces. L'activité des processus naturels contribue à maintenir les formes de géotopes actifs.

Type 5: Géotopes géomorphologiques impactés et menacés



Origine: naturelle
Activité: passif
Intérêts scientifiques principaux: géomorphologique (hydrogéologique, carrières)
Intégrité: impacté
Atteintes: beaucoup
Menaces: beaucoup
Vulnérabilité: fort
N= 13
Intrus 1-4 selon les attributs



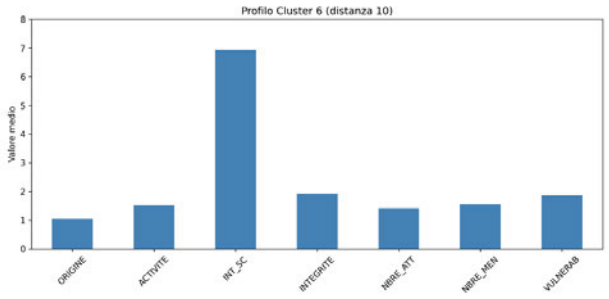
Affleurements de gypse, grotte et dolines du Col du Pillon (VD)



Exsurgences des Bons de Bière et de Mollens (VD)

Ce groupe rassemble 13 géotopes d'origine principalement naturelle, et un intérêt scientifique géomorphologique ou hydrogéologique ou liés à l'exploitation des ressources naturelles. Leur intégrité est déjà impactée. Il s'agit principalement de formes héritées (p.ex. des dépôts glaciaires) ou d'objets hydrogéologiques sensibles, souvent exposés à plusieurs types de pressions d'où une vulnérabilité élevée.

Type 6: Géotopes géomorphologiques impactés et peu menacés



Origine: naturelle
Activité: actif et passif
Intérêts scientifiques principaux: géomorphologique (hydrogéologique, carrières)
Intégrité: impacté
Atteintes: peu
Menaces: peu
Vulnérabilité: moyenne
N= 57
Intrus 2-6 selon les attributs



Terrasses fluvio-lacustres de l'Hongrin et de la Sarine Comba d'Avau - Montbovon - l'Auge (FR)



Drumlins entre Grandson et Concise (VD)

Ce groupe, l'un des plus importants avec 57 géotopes, rassemble des objets d'origine naturelle, à la fois actifs et passifs, et présentant un intérêt scientifique principalement géomorphologique. Leur intégrité est impactée, mais ils ne sont exposés qu'à peu d'atteintes et de menaces, ce qui se traduit par une vulnérabilité moyenne, nettement inférieure à celle du groupe 5.

Hiérarchisation de l'information et répartition des géotopes selon les six groupes

La typologie met en évidence une organisation nette des géotopes selon trois niveaux hiérarchiques (Fig. 12).

Au **niveau 1**, la distinction entre **géotopes géologiques** et **géotopes géomorphologiques**. Comme mentionné déjà plus haut, l'échantillon est composé de sensiblement plus de géotopes géomorphologiques (130, 68%) que géologiques (62, 32%).

Le **niveau 2** distingue les **géotopes en bon état de conservation de ceux qui sont impactés.** La répartition montre que les altérations ne sont pas réparties de façon homogènes : une majorité de géotopes (types 1, 2 et 4, 115 = 60%) restent intacts, tandis qu'une part plus réduite (types 3, 5 et 6, 77 = 40%) présente des impacts.

Au **niveau 3**, la distinction entre géotopes menacés et peu menacés montre que les situations de danger réel demeurent marginales et fortement localisées. En effet, les géotopes menacés se concentrent dans les types 3 et 5, pour un total de 7 respectivement 13 géotopes. Cette faible proportion (20 sur 192 géotopes) reflète en partie une réalité de terrain, mais aussi une sous-représentation structurelle. Nous rappelons ici que les sites déjà fortement impactés sont souvent exclus des inventaires, ce qui réduit la part des géotopes classés dans ces deux types. Reste le fait que la grande majorité des géotopes (90%), y compris certains présentant des impacts, n'est actuellement pas menacée.

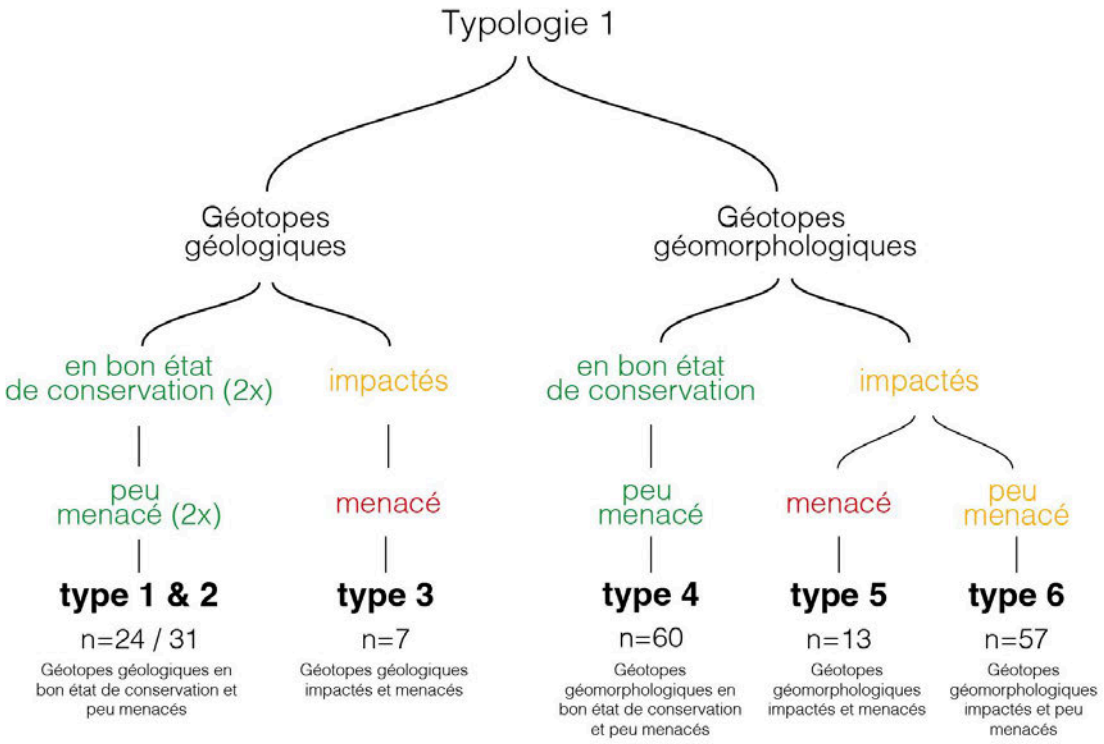


Fig. 12 : Graphe montrant la structuration des géotopes selon les trois niveaux de hiérarchisation: type de géotope, atteintes et menaces.

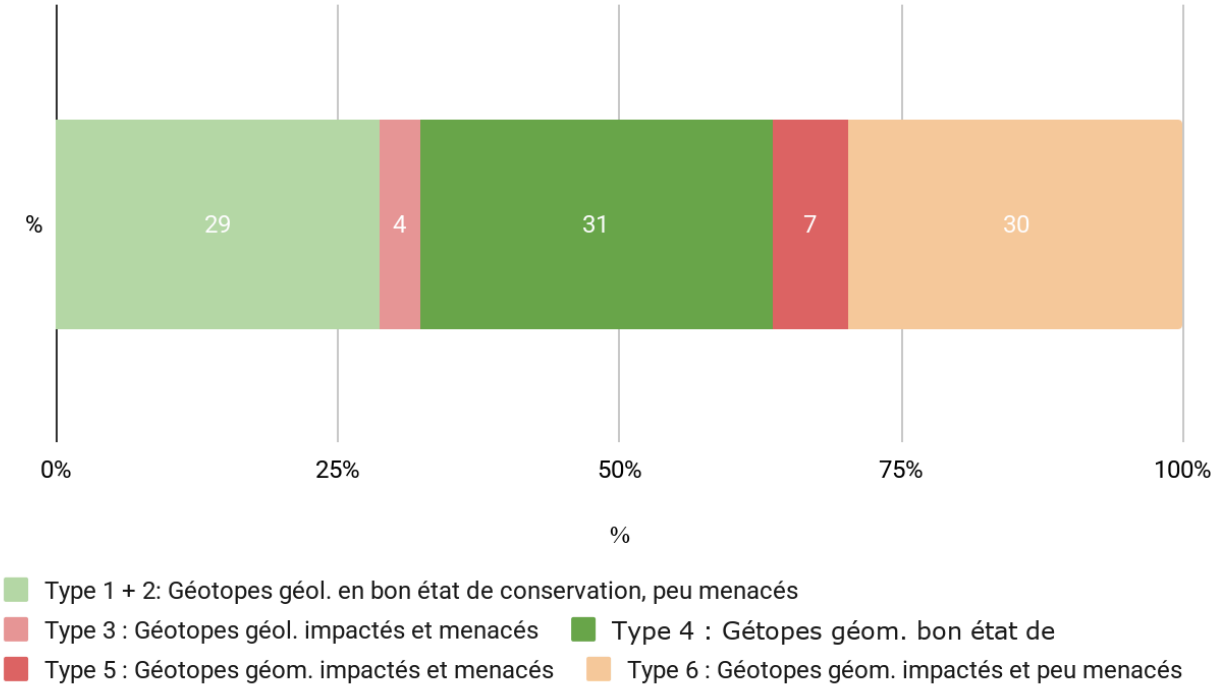


Fig. 13 : Répartition des géotopes sur les 6 types.

3.5. Typologie 2 (max. inventaires et individus)

Les tests menés en faisant varier le nombre d'inventaires, d'attributs et de géotopes considérés confirment les **tendances générales** mises en évidence par la typologie présentée ci-dessus. Les géotopes se répartissent dans les mêmes ordres de grandeur selon les 3 niveaux identifiés, malgré quelques petites variations (voir Tab. 4 et Annexe 6).

On observe une concordance parfaite entre les deux typologies pour les géotopes géologiques. Dans les deux cas, les objets se répartissent entre un groupe de géotopes intacts et peu menacés et un groupe de géotopes à la fois impactés et menacés.

Les géotopes géomorphologiques présentent une organisation similaire, avec un groupe d'objets intacts et peu menacés et un autre d'objets impactés, mais généralement peu menacés. La principale divergence concerne les géotopes géomorphologiques menacés : dans la typologie 1, ils sont rattachés au groupe des géotopes impactés, comme les géotopes géologiques, tandis que dans la typologie 2, ils sont associés au groupe des géotopes intacts.

Typologie 1 (max. critères)	**Typologie 2 (max. inventaires)**
68% de géotopes géomorphologiques 32% de géotopes géologiques	70% de géotopes géomorphologiques 30% de géotopes géologiques
60% de géotopes bien conservés 40% de géotopes impactés	56% de géotopes bien conservés 44% de géotopes impactés
10% de géotopes menacés 90% de géotopes peu menacés	18% géotopes à menacés variables 82% de géotopes peu menacés

Tab. 4 : Répartition des géotopes selon les deux typologies.

3.6. Apports d'une typologie basée sur l'état de conservation et le besoin de protection

Les tests réalisés avec différents inventaires, jeux d'attributs et effectifs montrent que la structure typologique est robuste. Si quelques variations de classement apparaissent selon les jeux de données, elles concernent principalement des géotopes situés à la limite entre deux groupes et ne remettent pas en cause l'organisation générale de la typologie.

Pour la gestion, cela implique plusieurs points clés :

- Les **géotopes géologiques** présentent une distinction très nette entre objets intacts et peu menacés / peu vulnérables et objets impactés et menacés / vulnérables. Cette cohérence facilite l'identification des priorités :
    - **surveillance légère** pour les premiers,
    - **mesures de protection ciblées** pour les seconds.
- Pour les **géotopes géomorphologiques**, la structure est comparable, mais les géotopes menacés sont classés différemment selon les deux typologies. Cette divergence montre que ces sites nécessitent une **évaluation plus approfondie** avant de définir les mesures de gestion les plus appropriées.

Le fait que les géotopes menacés soient **sous-représentés** dans les inventaires (voir chapitre 2.2) implique que la gestion doit intégrer une **vigilance** proactive :

- repérer les sites en dégradation avant qu'ils ne soient complètement détruit,
- renforcer le suivi des géotopes déjà classés comme impactés.

La typologie fournit une base solide et opérationnelle pour hiérarchiser les interventions. Elle permet de distinguer clairement :

- les sites à préserver,
- les sites à surveiller,
- les sites à gérer activement.

La question du pouvoir prédictif de la typologie a été discutée avec le comité de suivi, notamment pour savoir s'il était possible d'anticiper l'intégrité ou le niveau de menace d'un géotope sur la seule base de ses caractéristiques géologiques ou géomorphologiques. Bien que certaines correspondances existent — par exemple, les affleurements en bord de route ou les anciennes carrières sont plus fréquemment menacés, tout comme les formes glaciaires proches des agglomérations (moraines, drumlins) — il n'est pas possible de généraliser ces relations a priori. Les conditions locales, les usages du sol, l'accessibilité ou les dynamiques naturelles introduisent une variabilité trop importante pour permettre une prédiction fiable.

Plutôt que de chercher à prédire l'état d'un géotope, il apparaît plus utile de proposer une méthodologie, par exemple sous forme d'arbre décisionnel, permettant aux gestionnaires d'évaluer rapidement et de manière homogène les priorités de gestion pour les géotopes inventoriés.

Au-delà de son intérêt opérationnel, la typologie apporte également une contribution majeure sur le plan analytique. Conformément à l'objectif d'affiner les connaissances sur l'état de conservation des géotopes, elle permet pour la première fois d'obtenir une vue d'ensemble de la distribution des géotopes selon leur état de conservation et leur niveau de menace. Cette approche apporte ainsi une information nouvelle sur la structure globale du patrimoine géologique et géomorphologique évalué, en mettant en évidence la proportion relative des géotopes bien conservés et peu menacés, ainsi que celle des géotopes présentant des atteintes ou des menaces nécessitant une attention particulière. Ces résultats constituent une première base de connaissance qui devra toutefois être consolidée à mesure que des données complémentaires issues des inventaires cantonaux seront disponibles et qu'un plus grand nombre de géotopes pourront être intégrés à l'analyse.

4. Comparaisons avec d'autres typologies

4.1. Typologies naturalistiques

D'autres typologies de géotopes existent déjà. Les typologies utilisées dans le canton de Fribourg (Vonlanthen & Braillard, 2022) et par le service géologique allemand (Staatliche Geologische Dienste der Länder, 2018) reposent principalement sur les **caractéristiques naturelles** des géotopes. Elles classent les sites selon leurs **propriétés géologiques ou géomorphologiques**, en mettant l'accent sur la nature des formations ou les processus à leur origine (Tab. 5).

Typologie fribourgeoise	**Typologie allemande**
Grands ensembles structuraux et géotopes tectoniques Affleurements rocheux Géotopes gravitaires Géotopes résultant de processus karstiques Géotopes d'origine glaciaire ou périglaciaire Géotopes fluviatiles Géotopes lacustres et palustres	Affleurements* Formes géomorphologiques* Sources Cavités Objets géohistoriques *avec différents sous-groupes

Tab. 5 : Typologie fribourgeoise et allemande.

En comparaison, la typologie élaborée dans le cadre de cette étude adopte une **approche orientée vers la gestion**. Elle ne se limite pas à la description des caractéristiques naturelles, mais introduit deux dimensions supplémentaires essentielles pour la protection :

- **l'état de conservation**,
- **le niveau de menace**.

Cette approche fournit un cadre d'analyse permettant d'orienter les priorités de conservation et les mesures de gestion en fonction de l'état des géotopes et des pressions qu'ils subissent.

4.2. Typologie fondée sur les services géosystémiques

Plus récemment, Negri et Giardino (2025) ont proposé une classification des géotopes fondée sur les **services géosystémiques** (Frisk et al. 2022) (Tab. 6). Cette approche s'inscrit dans le prolongement des travaux sur les *ecosystem services*, en transposant le concept aux systèmes abiotiques. Les services géosystémiques désignent les **bénéfices que les géosystèmes fournissent aux sociétés humaines et au vivant**, qu'il s'agisse de fonctions naturelles, de ressources, de valeurs culturelles ou de contributions à la connaissance.

La littérature distingue généralement cinq grandes catégories de services géosystémiques :

- services de régulation (p. ex. stabilisation des versants, régulation hydrologique, atténuation des aléas),
- services de support (substrat pour les sols, habitats, cycles biogéochimiques),
- services de provision (ressources minérales, matériaux, eau),
- services culturels (paysages, identités locales, loisirs, spiritualité),
- services pour le développement de la connaissance (valeur scientifique, archives géologiques, sites d'enseignement)

avec à chaque fois plusieurs sous-catégories.

Classer les géotopes selon cette grille permet de mettre en évidence leur contribution directe ou indirecte à la société, en dépassant la seule dimension scientifique ou patrimoniale. Cette approche éclaire notamment :

- leur rôle dans les activités économiques (tourisme, ressources, agriculture),
- leur importance pour la sécurité et la résilience territoriale (aléas, eau, stabilité),
- leur valeur culturelle et identitaire
- leur fonction de support à la recherche et à l'éducation.

En ce sens, la typologie par services géosystémiques constitue un complément utile aux typologies fondées sur les caractéristiques naturelles ou l'état de conservation. Elle permet de renforcer l'argumentaire sociétal en faveur de la gestion et la préservation des géotopes : en montrant ce qu'ils apportent concrètement aux communautés, elle facilite la communication, la sensibilisation et la légitimation des mesures de protection.

Comparée à une typologie fondée sur les services géosystémiques, la typologie développée ici répond à un objectif différent mais complémentaire. Elle permet d'identifier les géotopes prioritaires en fonction de leur état de conservation et de leur niveau de menace, fournissant ainsi une base opérationnelle pour la gestion et la protection. À l'inverse, la typologie par services géosystémiques met en avant la valeur sociétale, économique et culturelle des géotopes. Elle sert surtout à justifier et légitimer les mesures de protection auprès des acteurs et du public. Ensemble, les deux approches renforcent la gestion : la première indique où intervenir, la seconde explique pourquoi ces interventions sont nécessaires et utiles.

5. Conclusions et perspectives

L'étude a permis d'établir pour la première fois un état des lieux détaillé de l'état de conservation des géotopes à l'échelle intercantonale, d'identifier les atteintes et menaces les plus fréquentes et d'estimer de manière proportionnée les besoins de protection. Plusieurs limites sont toutefois apparues, la plus importante étant la disponibilité des données : au moment de l'analyse, seules les informations issues de quatre inventaires cantonaux ont pu être exploitées. Pour les autres, les données étaient soit absentes (11 inventaires), soit présentées dans un format non directement utilisable (3 inventaires). Le qualificatif « suisse » doit donc être nuancé, même si l'on peut raisonnablement supposer que les tendances observées possèdent une portée générale. Ce manque de données met en évidence un déficit structurel dans la gestion de la composante abiotique de la nature (Justice et al. 2025), aussi en Suisse. Le biais lié à l'exclusion des sites déjà détruits ou fortement impactés — non retenus dans les inventaires ou retirés lors de leurs révisions — en est un autre indicateur.

La typologie élaborée dans le cadre de cette étude se révèle robuste et apporte une réelle plus-value pour la gestion des géotopes. La comparaison avec d'autres typologies existantes — notamment les typologies naturalistiques centrées sur les caractéristiques géologiques ou géomorphologiques, ainsi que celle fondée sur les services géosystémiques — montre que ces approches sont complémentaires. Alors que les typologies naturalistiques décrivent avant tout la nature des objets et que la typologie par services met en évidence leur utilité sociétale, la typologie développée ici se concentre spécifiquement sur l'état de conservation, les pressions et les besoins de protection. Elle comble ainsi une lacune en fournissant un outil directement orienté vers la gestion et la priorisation des interventions. Elle apporte également un éclairage nouveau sur la part des objets qui pourraient nécessiter des mesures de gestion ou de protection. Cette tendance devra toutefois être confirmée sur la base d'un échantillon plus large, à mesure que des données complémentaires issues des inventaires cantonaux seront disponibles.

En complément de cette première approche statistique, la seconde partie du projet sera consacrée aux enjeux de gestion des géotopes. Ceux-ci seront présentés et illustrés à l'aide d'exemples représentatifs, afin de mettre en évidence les principales problématiques rencontrées sur le terrain.

Bibliographie

Frisk E. L., Volchko Y., Sandström O. T., Söderqvist T., Ericsson L. O., Mossmark F., Lindhe A., Blom G., Lång L.-O., Carlsson C., Norrman J. (2022) The geosystem services concept – What is it and can it support subsurface planning? Ecosystem Services, 58, 2022, 101493. ISSN 2212-0416, https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101493.

Gray, M. (2011). Other nature: geodiversity and geosystem services. Environmental Conservation. 2011;38(3):271-274. doi:10.1017/S0376892911000117

Justice, S., Crofts, R., Gordon. J.E. & Gray, M. (2025). The Meaning of Nature: Clarification for strengthened protection and management. IUCN WCPA Issues Paper Series No. 5

Negri, A., Giardino, M. (2025). Integrating Geosystem Services classifications: a preliminary framework from the piedmont area of the Sesia Val Grande UNESCO Global Geopark. Geomorphometry 2025, Perugia. https://doi.org/10.5281/zenodo.15267534

Regolini, G, Martin, S. (2019). Stand der Geotopinventare der Schweiz. Rapport non publié.

Staatliche Geologische Dienste der Länder (2018) Arbeitsanleitung Geotopschutz in Deutschland: Leitfaden der staatlichen Geologischen Dienste der Länder der Bundesrepublik Deutschland. 2. aktualisierte und ergänzte Auflage, Jena.

Vonlanthen Q., Braillard L. (2022) Inventaire des géotopes d'importance cantonale: Etude de base. État de Fribourg, Service des forêts et de la nature, Section nature et paysage, pp. 65

Annexes

Annexe 1 - Structure de la base de donnée

Annexe 2 - Disponibilité des données

Annexe 3 - Corrélation de Pearson

Annexe 4 - Analyse en composante principale (ACP)

Annexe 5 - Classification Ascendante Hiérarchique: Typologie 1

Annexe 6 - Classification Ascendante Hiérarchique: Typologie 2

→ Se référer au document *Annexes au rapport technique*