

## Bilan annuel de l'activité volcano-tectonique dans le département du Puy de Dôme

(1<sup>er</sup> juillet 2024 – 30 juin 2025)

La cinquième réunion du comité de pilotage du PROVA<sup>2</sup> s'est tenue le 30 juin 2025 avec comme ordre du jour partiel :

- (1) **Bilan des réseaux et des observations**
- (2) **Bilan des activités scientifiques**
- (3) **Bilan des activités de communication**
- (4) **Synthèse**

La structuration de l'ordre du jour est amenée à constituer une trame fixe qui sera reprise lors de la réunion annuelle du comité de pilotage du Pôle Régional d'Observation de l'activité Volcano-tectonique d'Auvergne et d'Ardèche (PROVA<sup>2</sup>) afin d'établir un bilan annuel d'activité uniformisé en guise de compte-rendu. Ce bilan annuel est un document de base pour identifier les avancées significatives, définir les orientations de l'année à venir et recenser des éléments de réponse vis-à-vis d'éventuelles sollicitations externes (collaborateurs, services publics, médias et population).

Pour rappel, PROVA<sup>2</sup> est une initiative portée par l'expertise technique de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand (OPGC) et l'expertise scientifique du Laboratoire Magma et Volcans (LMV) et de ses collaborateurs visant à :

- Promouvoir des actions d'observation de l'activité volcano-tectonique sur le territoire local ;
- Favoriser la structuration des mesures et enregistrements acquis en base de données ;
- Déployer une réponse opérationnelle complémentaire en cas d'activité significative ;
- Promouvoir la recherche et la formation basées sur la richesse géologique locale ;
- Renforcer la présence du LMV et de l'OPGC auprès des acteurs locaux et des populations ;
- Apporter des éléments de réponse aux demandes émanant des organismes publics.

**Membres présents du comité de pilotage :** G. Boudoire, G. Delcampo, P. Freville, L. Gailler, Y. Guehenneux, B. Moine, P. Labazuy, D. Laporte (représentant A. Bouhifd), E. Régis, T. Souriot, E. Thebault

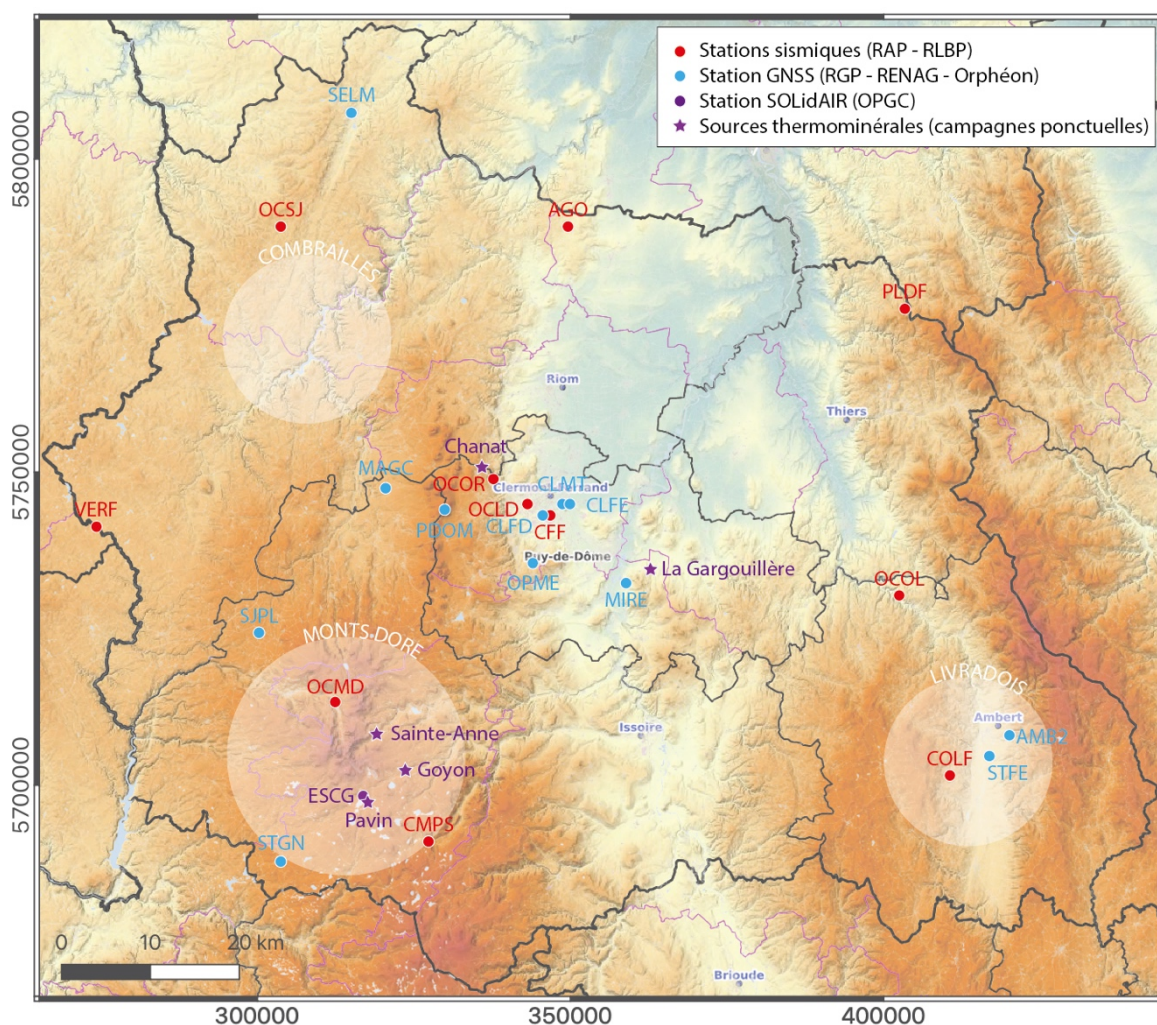
**Excusés :** J. Battaglia, V. Cayol, E. Médard, C. Merciecca, P.-J. Gauthier

**Membres invités :** -

## 1. Bilan des réseaux et des observations

Sur le département du Puy de Dôme, l'infrastructure de recherche EPOS-France recense 11 stations sismologiques et 12 stations GNSS (**Fig. 1**). Aucune nouvelle station permanente n'a intégré les réseaux nationaux en 2024-2025.

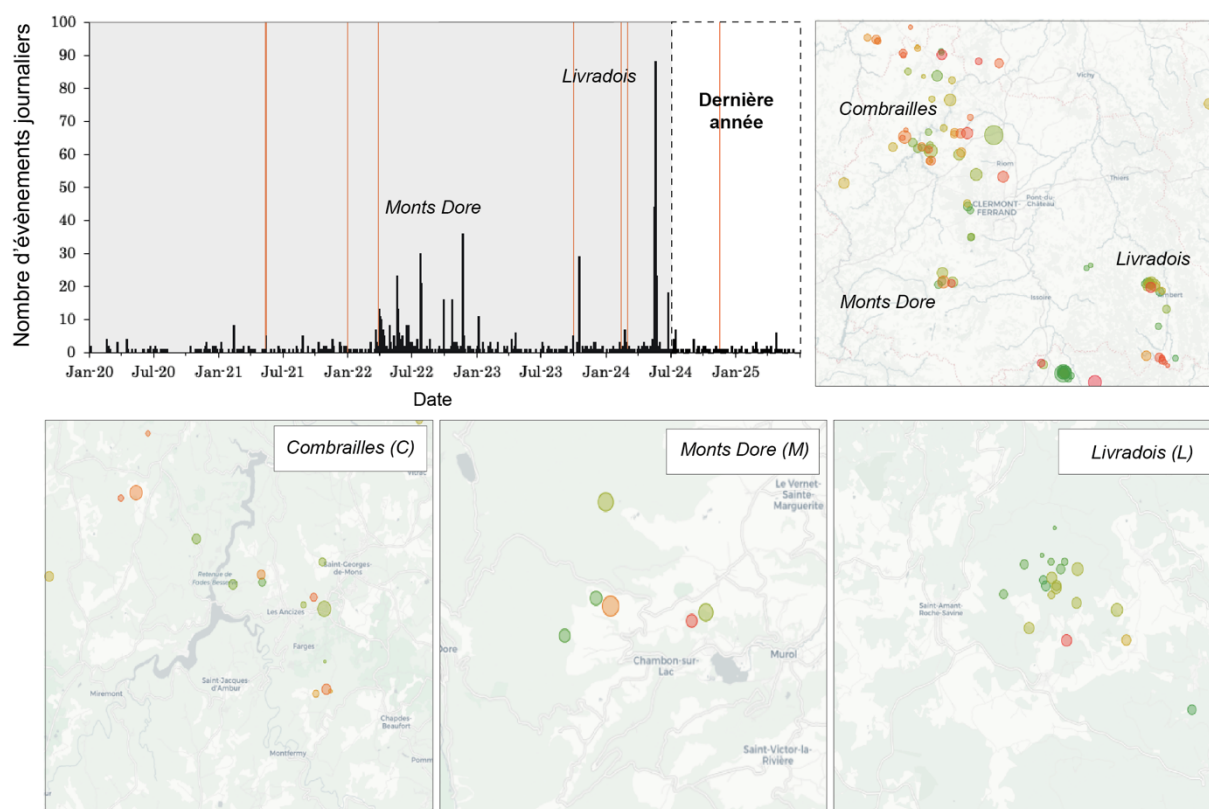
Dans le cadre de la convention ReODORE (Renforcement du réseau d'Observation sur le massif des Monts DORE) entre la Direction Départementale des Territoires du Puy de Dôme (DDT63) et l'Université Clermont Auvergne (UCA) pour la période 2023-2028, ce réseau est complété depuis le 14 juin 2024 par l'installation d'une station SOLidAIR (**Fig. 1**) développée par l'OPGC permettant de suivre l'évolution du dégazage diffus sur le massif des Monts Dore. Dans le cadre de cette même convention, un suivi quadrimestriel des paramètres physico-chimiques de 5 sources thermominérales est réalisé (**Fig. 1**), auquel s'est ajouté un profil vertical annuel des paramètres physico-chimiques du lac Pavin (**Fig. 1**).



**Fig. 1.** Carte des stations sismologiques et GNSS des réseaux nationaux sur le département du Puy de Dôme (source EPOS-France) et localisation de la station SOLidAIR et des sources thermominérales échantillonnées périodiquement dans le cadre de la convention ReODORE entre la DDT63 et l'UCA. Les principaux secteurs sismogènes du département (Combrailles, Monts Dore, Livradois) sont indiqués. Fond de carte compilé depuis QGIS (sources Géoportail et IGN).

## 1.1. Sismologie

Sur la période du 1<sup>er</sup> juillet 2024 au 30 juin 2025, près de 104 évènements sismiques de magnitude inférieure à 2.5 ont été détectés par le BSCF-RéNaSS sur le département du Puy-de-Dôme (**Fig. 2**). Par rapport à l'activité moyenne sur la période 1996-2016 (environ 110 évènements sismiques annuels ; Battaglia et Douchain, 2016), l'activité 2024-2025 s'inscrit dans la normalité après trois années consécutives d'activité sismique notable sur le département.



**Fig. 2.** Evolution temporelle journalière des évènements sismiques depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2020 et localisation des évènements sismiques entre le 1<sup>er</sup> juillet 2024 et le 30 juin 2025 depuis le catalogue du BCSF-RéNaSS. Évènements sismiques des plus anciens aux plus récents du vert au rouge. Les barres verticales rouges sur l'histogramme représentent les jours au cours desquels des séismes « Deep Long Period » ont été détectés et communiqués par nos partenaires.

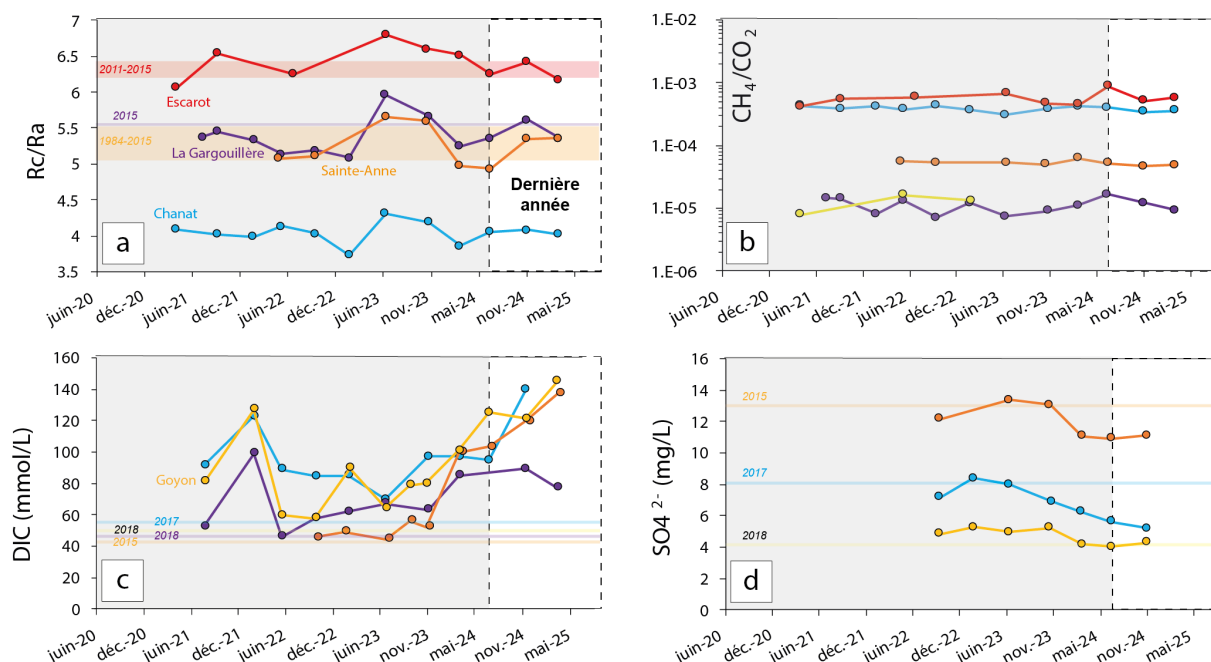
## 1.2. Géochimie des fluides

L'échantillonnage et les analyses physico-chimiques quadrimestriels des sources thermominérales ont révélé sur l'année 2024-2025 (**Fig. 3**) :

- Une évolution du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  dans la phase gazeuse de l'ensemble des sources sur des valeurs intermédiaires, i.e., dans un intervalle de valeurs conforme à celui précédemment rapporté dans la littérature scientifique ante-2020 ;
- En revanche l'augmentation progressive de la concentration en carbone dissout (DIC) dans la phase aqueuse de l'ensemble des sources se poursuit. Les concentrations maximales furent atteintes lors de la dernière campagne d'échantillonnage à la fin de l'hiver 2025.



Aucune variation significative (voire une diminution) des concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  dans la phase aqueuse des sources n'a été observée sur l'année écoulée.



**Fig. 3.** Evolution de certains paramètres physico-chimiques dans la phase gazeuse (a, b) et la phase aqueuse (c, d) des sources thermominérales. Pour chaque source, les valeurs historiques (1984-2018) issues de la littérature sont indiquées par les bandes horizontales colorées (Matthews et al., 1987 ; Bräuer et al., 2017 ; Moreira et al., 2018 ; Ricci et al., 2024 ; données non publiées du GEOLAB). Analyses réalisées par l'Istituto Nazionale di Geofisica et Vulcanologia – Sezione di Palermo (INGV Palermo) et le Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale (GEOLAB) dans le cadre du projet ClerVolc DégazRift (2021-2023) (Boudoire et al., 2025) et de la convention ReODORE (2024-2028).

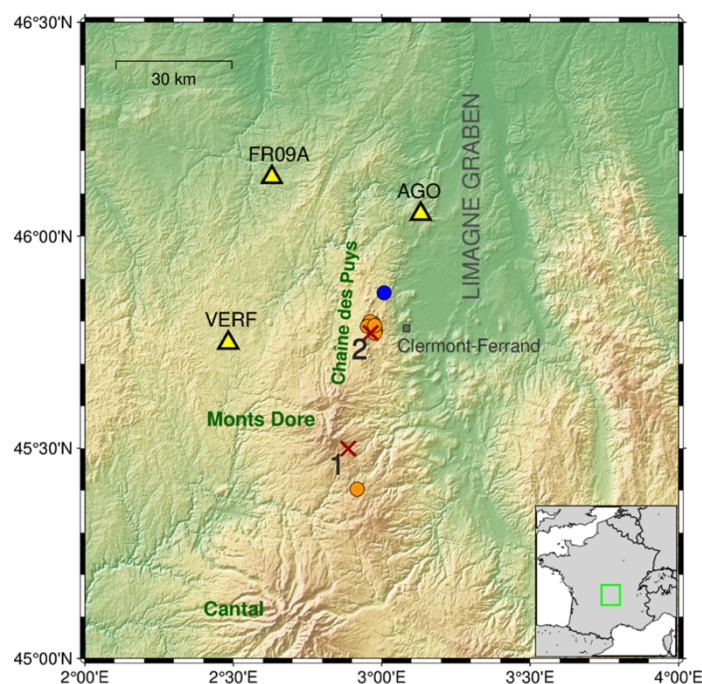
### 1.3. Évènement remarquable : détection de séismes « Deep Long Period »

Une communication par mail a été réalisée le 15 janvier 2025 auprès du SIDPC, de la DDT63, du SDIS63 et de la DREAL AURA sur la détection inédite de séismes dits « Deep Long Period (DLP) » dans le département (Shapiro et al., 2025). Cet évènement remarquable a également communiqué aux tutelles CNRS et UCA ainsi qu'à l'ensemble du personnel du LMV et du PROVA². Une réunion a eu lieu le 16 avril 2025 au LMV avec le SIDPC, la DDT63, la DREAL AURA et le BRGM sur ce sujet. Un résumé des informations principales communiquées est disponible ci-dessous.

Le LMV et l'OPGC sont parties prenantes d'un projet de recherche ANR (MACIV) portée depuis 2022 par ISTERRE (Grenoble) portant sur l'imagerie sismique du Massif Central. A ce titre de nombreuses stations sismiques ont temporairement été installées dans le Massif Central et les premiers résultats commencent à émerger, dont la détection inédite de séismes DLP (Deep Long Period) à plus de 25 km de profondeur sous la Chaîne des Puys (secteur Puy de Dôme) et dans une moindre mesure sous le massif des Monts Dore (secteur Pavin). (**Fig. 4**) Le catalogue du BCSF-RéNaSS basé sur les données de réseaux sismologiques d'EPOS-France en recenserait une petite dizaine depuis 2021 mais des investigations complémentaires sont en cours pour mener un travail plus poussé d'investigation des enregistrements sismiques sur les dernières années (certains évènements n'ont pas forcément été détectés par le BCSF et nécessitent des protocoles de détection particuliers).

La présence de séismes DLP sous ces massifs volcaniques est une nouveauté car ces séismes, connus sous de nombreux édifices volcaniques à travers le monde, sont interprétés comme résultant du dégazage potentiel de magma en activité en profondeur. Compte-tenu du contexte géodynamique, du nombre et de la fréquence des événements détectés jusqu'à présent, la situation ressemble à celle observée depuis plusieurs années dans le massif volcanique de l'Eifel en Allemagne, endormi également depuis une dizaine de milliers d'années, mais qui présente des signes actuels d'activité magmatique.

La présence d'une activité magmatique profonde sous le Massif Central n'a rien d'anormale. Elle est depuis longtemps suggérée par les manifestations hydrothermales et les anomalies géothermiques dans la région et confortée par les différents travaux réalisés localement ces dernières années. Si ces résultats ne présument en rien de la possibilité d'un regain de l'activité éruptive à plus ou moins court terme, ils doivent en revanche nous encourager à garder à l'esprit que l'activité volcanique en Auvergne et notamment dans le département existe depuis des millions d'années et fût marquée par de nombreuses pauses (e.g., période de quiescence) de plusieurs milliers à dizaines de milliers d'années. Nous sommes actuellement dans une telle période de quiescence depuis près de 7 000 ans dont il est impossible de connaître la fin avec les moyens actuels.

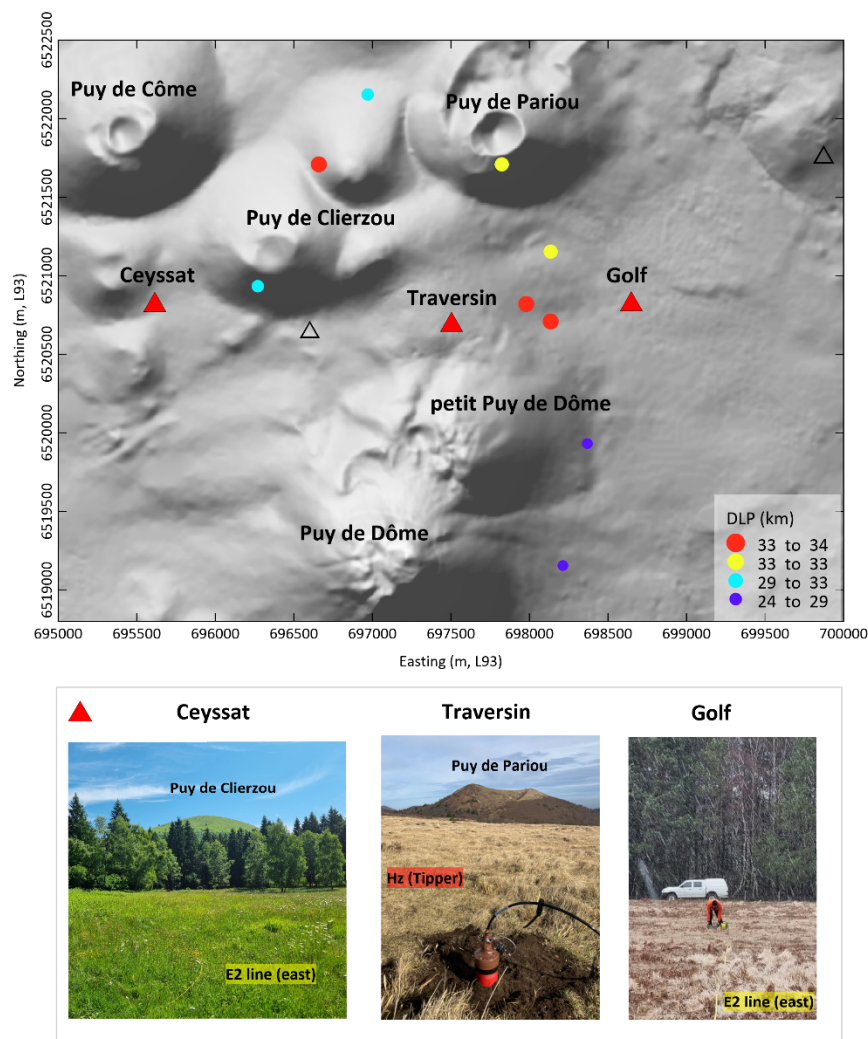


**Fig. 4.** Localisation des séismes DLP (en orange) détectés depuis 2021 dans le département du Puy-de-Dôme (Shapiro et al., 2025).

Une campagne de mesures magnétotelluriques (stations MT financées par le Labex ClerVolc et le projet Caprice) a été initiée depuis février 2025 pour imager la distribution des conductivités électriques à grande profondeur (> 30 km) le long d'un profil recoupant l'axe principal des DLP enregistrées dans le secteur de la Chaîne des Puys (**Fig. 5**).

L'objectif est de mettre en évidence les principales hétérogénéités mécaniques à l'aplomb de la zone, la présence éventuelle de fluides en profondeurs ainsi que les axes de transferts préférentiels. L'acquisition des données étant réalisée sur des séries temporelles de plusieurs jours sur chaque point de mesure, toute modification des structures de conductivité pourra être analysée, en lien par exemple avec l'enregistrement de nouveaux DLP.

Notons qu'il s'agit d'une méthode électromagnétique passive, les données sont donc affectées par un bruit anthropique conséquent sur certains points de mesures. Les traitements sont en cours et seront associées en partie à une thèse de doctorat qui débutera à la rentrée 2025.



**Fig. 5.** Localisation des stations MT à l'aplomb des DLP dans le secteur Chaîne des Puys (triangles rouges : sondages effectués, triangles vides noirs : sondages en perspective). Les DLP sont représentés avec un code couleur fonction de la profondeur.

#### 1.4. Campagne de mesures gravimétriques absolues (du 13 au 15 mai 2025)

Dans le cadre des collaborations initiées notamment via PROVA<sup>2</sup> entre les Services Nationaux d'Observation en Volcanologie et en Gravimétrie (SNOV et SNOG), une campagne de mesures gravimétriques absolues a été réalisée le long de la ligne d'étalonnage emblématique Cézeaux-Puy de Dôme (**Fig. 6**). Pour rappel, la mesure de la Gravimétrie Absolue (champ de pesanteur de la Terre) est un outil indispensable pour détecter les mouvements de la croûte terrestre et de ses variations internes. D'un point de vue gravimétrique, le Puy de Dôme est un site exceptionnel par sa position centrale en France, ainsi que son éloignement des marées océaniques et son écart gravimétrique exceptionnel entre



une base de mesures sur le Campus des Cézeaux et celle du sommet. Des stations de mesures intermédiaires existent notamment au niveau de la commune d'Orcines.

Cette campagne a impliqué la collaboration entre l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière), le BGI et le GET (Bureau Gravimétrique International- Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse) et l'OPGC (Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, UCA-LMV), avec le soutien du Conseil Départemental et des différents acteurs du site.

Il s'agit de la première campagne de mesures de répétitions depuis 2005 avec différents objectifs :

- Une comparaison instrumentale (gravimètres absolues 'A10' et relatifs 'CG5 et CG6')
- La mise en évidence de potentielles variations gravimétriques le long de la ligne de mesures
- Une discussion autour des campagnes futures dédiées à l'étude de la structure interne du Puy de Dôme, et autour de la pertinence de mesures permanentes dans le secteur.

Le traitement des données est en cours de finalisation et cette campagne fait également l'objet d'une brève EPOS-France en cours de publication. En termes de perspectives, une campagne de réitération dans le secteur de l'anomalie gravimétrique négative mise en évidence par le passé au niveau de la Nugère est envisagée.



**Fig. 6.** Mesures gravimétriques absolues et relatives sur la ligne d'étalonnage Cézeaux-Puy de Dôme (mai 2025)

## 2. Bilan des activités scientifiques

### 2.1. Production interne

#### Identification des zones de forte perméabilité dans le secteur du Lac Pavin (Rafflin et al., 2025)

Cette étude se focalise sur l'identification des zones de forte perméabilité dans la zone du Lac Pavin via un couplage de méthodes géochimiques (flux de CO<sub>2</sub> à travers le sol, isotopie du carbone) et géophysiques (magnétisme, tomographie de résistivité électrique). Les principaux points d'intérêt à visée opérationnelle identifiés sont :

- Deux zones principales de forte perméabilité (secteurs Les Sagnes et L'Escarot) à partir desquelles des simulations de propagation de coulées de lave ont été réalisées dans le cadre d'un exercice théorique.
- Selon ces simulations, les temps d'arrivée à Besse-et-Saint-Anastaise d'une éventuelle coulée de lave à partir d'un potentiel événement éruptif situé aux Sagnes varient entre 30 minutes et une dizaine d'heures (en fonction de la composition de la lave émise : basanite ou trachybasalte).

Ci-dessous, le résumé de l'article scientifique traduit en français :

*« L'atténuation des risques dans les provinces volcaniques en période de longue quiescence est souvent entravée par le manque d'informations sur les scénarios éruptifs potentiels. C'est le cas de la province volcanique des Monts Dore (France), où la dernière séquence éruptive s'est produite il y a environ 7000 ans dans le secteur du lac Pavin. Alors que les principaux travaux récents se sont concentrés sur des simulations d'éruption limnique potentielle du lac en raison de la présence de CO<sub>2</sub> dans la couche d'eau profonde, aucune information n'est fournie sur l'évaluation des risques associées à la propagation de potentielles coulées de lave dans le secteur. Dans cette étude, une approche innovante est menée en couplant des études géochimiques (dégazage du CO<sub>2</sub> dans le sol) et géophysiques (magnétisme, tomographie de résistivité électrique) pour identifier des zones et des structures (cachées) marquées par des processus de circulation et d'altération des fluides. Ces voies préférentielles pour l'ascension des fluides actuels peuvent être considérées, en raison de leur perméabilité élevée, comme des voies potentielles pour l'ascension du magma en cas de réactivation volcanique. Dans un tel scénario hypothétique, la modélisation a priori des coulées de lave peut aider à déterminer les zones d'infrastructure les plus exposées et fournir ainsi de nouvelles informations aux autorités locales en ce qui concerne l'utilisation des sols. Nos résultats montrent que, même dans les provinces volcaniques en sommeil depuis longtemps, les outils communs utilisés sur les volcans actifs pour l'évaluation des risques peuvent être appliqués pour améliorer les stratégies d'atténuation des risques. »*

#### Essaim sismique 2021-2022 des Monts Dore : identification de structures sismogènes (Gailler et al., 2025)

Cette étude se focalise sur la caractérisation spatiale de l'essaim sismique ayant eu lieu au sein du massif des Monts Dore en 2021-2022. Les campagnes de prospection géophysiques et géochimiques ont permis de dégager les informations suivantes :

- L'essaim sismique s'est développé au Nord-Ouest du lac Chambon entre 3 et 7 km de profondeur.
- La localisation des hypocentres suggère un lien important avec la tectonique régionale, notamment la présence de deux structures principales orientées N173-85W et N13-68W.
- La réactivation de ces structures pourrait être liées à un apport de fluides hydrothermaux sous-jacents (identification de zones conductrices majeures à plus de 8 km de profondeur).



Ci-dessous, le résumé de l'article scientifique traduit en français :

*« Les provinces volcaniques en période de longue quiescence restent d'excellents proxys pour l'étude des édifices actifs. La province volcanique des Monts Dore (Massif Central) a récemment été le site d'un épisode sismique unique. Des études géophysiques ont été menées à différentes échelles spatiales horizontales et verticales. Les anomalies magnétiques mettent en évidence des hétérogénéités mécaniques cohérentes avec le contexte tectonique régional. Les structures faiblement conductrices imagées suggèrent la présence de fluides remontant le long des chemins principaux à différentes profondeurs. Bien que nous ne puissions pas exclure strictement une explication purement tectonique, nos données semblent soutenir l'origine de la sismicité comme étant liée à l'injection de fluides en profondeur contrôlée par des contraintes structurales internes. »*

Essaim sismique 2021-2022 des Monts Dore : origine de la réactivation des structures sismogènes (Boudoire et al., 2025)

Cette étude se focalise sur la caractérisation temporelle de l'essaim sismique ayant eu lieu au sein du massif des Monts Dore en 2021-2022. Les séries temporelles géophysiques et géochimiques ont permis de dégager les informations suivantes :

- Absence de marqueurs classiques liés à une intrusion magmatique superficielle.
- Forte variabilité chimique des sources thermominérales locales quelques semaines avant le début de l'essaim sismique.
- Il est proposé que l'essaim sismique soit lié à la réactivation de structures tectoniques régionales sous l'effet d'une modification des propriétés physico-chimiques des fluides hydrothermaux sous le massif des Monts Dore.
- Cette modification des propriétés physico-chimiques des fluides hydrothermaux pourrait être liée au dégazage de magma stocké au sein du manteau.

Ci-dessous, le résumé de l'article scientifique traduit en français :

*« Au cours des années 2021-2022, un essaim sismique inhabituel a été enregistré au sein de la croûte continentale sous la province volcanique des Monts Dore (France). Des mesures complémentaires sur le terrain et à distance ont été effectuées. Avec les séries temporelles enregistrées sur les réseaux sismologiques et GNSS nationaux, ces mesures ont été fondamentales pour suivre l'évolution de l'essaim sismique et étudier son origine. Bien qu'une migration verticale potentielle des événements sismiques soit suggérée, les mesures complémentaires écartent vraisemblablement l'hypothèse d'une intrusion de magma à faible profondeur dans la croûte terrestre. L'ascension d'un fluide riche en CO<sub>2</sub> provenant du manteau pourrait avoir réagi avec le système hydrothermal sous le Monts-Dore depuis au moins l'été 2021, conduisant à la réactivation sismique de structures tectoniques préexistantes. Le retour d'expérience sur la gestion de l'essaim sismique de 2021-2022 donne lieu à plusieurs recommandations qui devraient être prises en compte à l'avenir pour mieux affronter et traiter au niveau national les questions soulevées dans les provinces volcaniques en sommeil depuis longtemps en France métropolitaine. »*

## 2.2. Production externe

Détection de séismes DLP sous les volcans du Massif Central (Shapiro et al., 2025)

Voir encart dans la section précédente sur cet événement remarquable.

### 3. Bilan des activités de communication

#### 3.1. Scientifique

La communication scientifique dans le cadre du PROVA<sup>2</sup> s'est matérialisée en 2024-2025 par :

- Quatre articles scientifiques dans des revues internationales de rang A :
  - ⇒ Rafflin, V., Gailler, L., Aumar, C., Cluzel, N., Gal, F., ... & Boudoire, G. (2025). Preferential fluids ascent paths revealed by coupling chemical, electrical and magnetic methods: insights for risk mitigation in a long-dormant volcanic province (Monts Dore, France). *JGR: Solid Earth*.
  - ⇒ Gailler, L., Grace, C., Boudoire, G., Grunberg, M., Battaglia, J., ... & Thébault, E. (2025). Scientific response to the 2021-2022 seismic swarm in the Monts Dore volcanic province (France): structural insights from punctual surveys (1/2). *CRAS*.
  - ⇒ Boudoire, G., Gailler, L., Battaglia, J., Beauger, A., Bontemps, M., ... & Thébault, E. (2025). Scientific response to the 2021-2022 seismic swarm in the Monts Dore volcanic province (France): dynamic insights from temporal surveys (2/2). *CRAS*.
  - ⇒ Shapiro, N. M., Aubert, C., Chevrot, S., Mordret, A. Paul, A., ... & Thébault, E. (2025). Deep Long Period earthquakes beneath volcanoes of the French Massif Central. *Geophysical Research Letters*.
- Une intervention orale lors des Journées des Directeurs d'Unité (JDU) du CNRS-INSU le 5 novembre 2024 :
  - ⇒ Bianco, A. & Boudoire, G. (2024). Auvergne : terres volcaniques et nuages. Journées des Directeurs d'Unités du CNRS-INSU 2024 (Clermont-Ferrand).
- Un poster lors de l'Assemblée Générale du Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV) du CNRS-INSU les 18 et 19 novembre 2024 :
  - ⇒ Gailler, L., Boudoire, G. & PROVA<sup>2</sup> team (2024). L'essai sismique de 2021-2022 des Monts Dore (France). AG SNOV 2024 (Clermont-Ferrand).
- L'organisation en juin 2025 d'une visite scientifique internationale de la Chaîne des Puys et des Monts Dore dans le cadre du congrès de l'IAVCEI organisé à Genève.

#### 3.2. Services publics

Les interventions auprès des services publics sur la période 2024-2025 sont les suivantes :

- 10 octobre 2024 : Réunion DDT63-SIDPC-SDIS-DREAL-BRGM-OPGC-LMV sur le bilan d'activité annuel 2023-2024.
- 15 janvier 2025 : Communication au SIDPC-DDT63-SDIS-DREAL sur la détection de séismes DLP dans le département.
- 16 avril 2025 : Réunion DDT63-SIDPC-DREAL-BRGM-OPGC-LMV sur les séismes DLP.
- 26 mai 2025 : Participation du LMV et de l'OPGC à une réunion préparatoire organisée par le BRGM en vue d'une formation des autorités locales aux problématiques liées aux risques sismiques.

#### 3.3. Population

Via les médias et manifestations scientifiques, les interventions suivantes ont eu lieu en 2024-2025 dans le périmètre des activités du PROVA<sup>2</sup> :

- 1 intervention le 29 septembre 2024 dans un article de presse (La Montagne) sur les problématiques liées au Lac Pavin.

- 1 intervention orale le 28 novembre 2024 lors d'une conférence publique organisée par la Société Géologique de France (SGF) sur la thématique « Volcanisme auvergnat : risques associés au dernier site éruptif ».
- 1 intervention dans un podcast d'EPOS-France le 5 février 2025 au sujet de l'essai sismiques 2021-2022 des Monts Dore.
- 1 intervention le 4 juin 2025 dans un article dans un article de presse (Journal du Net) sur le réveil des volcans d'Auvergne.
- 1 intervention le 27 juin 2025 auprès de France 3 Auvergne sur le réveil des volcans d'Auvergne.



## 4. Synthèse

Suite à trois années de sismicité notable dans le département, la période s'étendant du 1<sup>er</sup> juillet 2024 au 30 juin 2025 fût caractérisée par une activité sismique classique, avec un nombre d'évènements sismiques annuel similaire à celui rapporté pour la période ante-2020. Une observation similaire est faite pour le rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  de la phase gazeuse des sources thermominérales.

Seul le carbone dissout dans la phase aqueuse des sources thermominérales continue à croître de manière régulière depuis l'automne 2023.

**N.B.** Il est souligné que les paramètres étudiés, liés à des phénomènes naturels, peuvent être amenés à évoluer de manière imprévue et rapide, parfois sans avertissement. Ce document à l'initiative du PROVA<sup>2</sup> a uniquement pour objet d'informer sur l'état de l'art des observations et des données scientifiques acquises sur les phénomènes naturels volcano-tectoniques d'intérêt dans le département du Puy-de-Dôme portées à connaissance du PROVA<sup>2</sup>. Ce document fournit des informations scientifiques en utilisant les meilleures connaissances scientifiques disponibles. Toutefois, en raison de la complexité des phénomènes naturels en question, rien ne peut être imputé au PROVA<sup>2</sup> quant au caractère éventuellement incomplet et incertain des données rapportées et des événements futurs, ni au caractère prévisionnel qui pourrait lui être afféré. PROVA<sup>2</sup> n'est pas responsable de l'utilisation, même partielle, du contenu de ce document par des tiers, ni des conséquences causées à des tiers. Les données contenues dans ce document est la propriété du PROVA<sup>2</sup> et de ses collaborateurs. La diffusion, même partielle, des contenus n'est autorisée qu'à des fins de protection civile.

## Références

- Aeschbach-Hertig, W., Hofer, M., Kipfer, R., Imboden, D. M., & Wieler, R. (1999). Accumulation of mantle gases in a permanently stratified volcanic Lake (Lac Pavin, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(19-20), 3357-3372.
- Battaglia, J., & Douchain, J. M. (2016). Réseaux sismologiques d'Auvergne. *Rev. d'Auvergne*, 260-261.
- Boudoire, G., Padeloup, G., Schiavi, F., Cluzel, N., Rafflin, V., Grassa, F., ... & Rizzo, A. L. (2023). Magma storage and degassing beneath the youngest volcanoes of the Massif Central (France): Lessons for the monitoring of a dormant volcanic province. *Chemical Geology*, 634, 121603.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., & Wetzel, H. U. (2017). Regional distribution pattern of carbon and helium isotopes from different volcanic fields in the French Massif Central: Evidence for active mantle degassing and water transport. *Chemical Geology*, 469, 4-18.
- Daffos, C., Arbaret, L., Bourdier, J. L., & Gumiaux, C. (2024). Regional structural control on the Mont-Dore plio-quaternary volcanism (France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 447, 108029.
- Hottin, A., Chevremont, P., Marteau, P., Menillet, F., Moulin, M., & Dominique, P. (1998). Carte géologique de la France à 1/50 000: Feuille 719 Ambert avec notice explicative.
- Matthews, A., Fouillac, C., Hill, R., O'Nions, R. K., & Oxburgh, E. R. (1987). Mantle-derived volatiles in continental crust: the Massif Central of France. *Earth and Planetary Science Letters*, 85(1-3), 117-128.
- Merle, O., Aumar, C., Labazuy, P., Merciecca, C., & Buvat, S. (2023). Structuration tertiaire et quaternaire du Plateau des Dômes (Chaîne des Puys, Massif central, France). *Géologie de la France*.
- Michard, G., Viollier, E., Jézéquel, D., & Sarazin, G. (1994). Geochemical study of a crater lake: Pavin Lake, France—Identification, location and quantification of the chemical reactions in the lake. *Chemical Geology*, 115(1-2), 103-115.
- Moreira, M., Rouchon, V., Muller, E., & Noirez, S. (2018). The xenon isotopic signature of the mantle beneath Massif Central. *Geochemical Perspectives Letters*, 6, 28-32.
- Rafflin, V., Boudoire, G., Massaro, S., Stocchi, M., Costa, A., Grassa, F., ... & Harris, A. (2024). Modelling CO<sub>2</sub> dispersion in the air during potential limnic eruption at the lake Pavin (France). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108024.
- Raynal, J. P., Defive, E., Klee, N., Buso, R., & Laporte, D. (2023). A tale of old and young volcanoes in Monts d'Ardèche UNESCO Global Geopark (south-eastern France). *Geoconservation Research*, 6(1), 207-232.
- Ricci, L., Frondini, F., Morgavi, D., Zuccolini, M. V., Boudoire, G., Laumonier, M., ... & Chiodini, G. (2024). CO<sub>2</sub> flux from the French Massif Central groundwaters: Modelling and quantitative estimation of the degassing process. *Chemical Geology*, 122012.