

L'imagerie géophysique : outil essentiel pour la caractérisation de la géomorphologie du plateau de Gergovie

Les chercheurs du Laboratoire de volcanologie Magmas et Volcans rattaché à l'Université Clermont Auvergne (UCA) ont à deux reprises au printemps, en 2020 et 2021, ausculté le plateau de Gergovie par des mesures géophysiques. Ces recherches ont servi de travaux pratiques pour les étudiants de 1^{re} année de master Géologie de l'aménagement, de l'Université Clermont Auvergne et de 2^e année de master Géophysique, de Sorbonne Université, sous la conduite de Philippe Labazuy, physicien-adjoint (Magmas et Volcans).

Les méthodes géophysiques au service de la géologie et de l'archéologie

Dans le cadre des projets archéologiques récents menés sur le site emblématique du plateau de Gergovie, les chercheurs de l'équipe de volcanologie du Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), rattaché à l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont (OPGC), au sein de l'Université Clermont Auvergne (UCA), ont été sollicités pour plusieurs études, soit sur le sommet du plateau soit sur ses versants. Ces projets associent des chercheurs de différents laboratoires de l'UCA, des chercheurs de l'INRAP, et visent à décrypter l'évolution géomorphologique du plateau de Gergovie ainsi que son occupation, notamment pendant la période gallo-romaine.

Ces études scientifiques, réalisées pour l'essentiel en 2020 et 2021, ont notamment consisté en différentes expérimentations géophysiques au moyen de multiples méthodes de prospection, comme la tomographie de résistivité électrique (ou ERT : Electrical Resistivity Tomography), la méthode magnétique et l'électromagnétisme. Ces différentes méthodes (présentées ci-après) ont été mises en œuvre selon des dispositifs de dimensions variées, pour des profondeurs

d'investigation allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur sous la surface topographique.

Les méthodes géophysiques sont des méthodes indirectes, non destructives, sans aucun impact sur l'environnement naturel (faune, végétation) et sans aucun danger pour l'homme. Elles permettent la mesure de paramètres physiques des terrains géologiques qui constituent le sous-sol du secteur d'étude. L'analyse de la variation spatiale de ces paramètres et l'élaboration de modèles en deux ou trois dimensions du sous-sol permettent de caractériser la nature, la géométrie et l'organisation spatiale des formations géologiques du site d'étude. Il est toutefois important de noter que plusieurs modèles de terrains différents peuvent expliquer un signal géophysique mesuré. Cette non-unicité des modèles géophysiques susceptibles d'expliquer les observations requiert de comparer et confronter si possible les données à une "vérité-terrain" apportée par exemple par des sondages géotechniques, des logs de forages, des coupes et affleurements naturels, etc. En effet, les paramètres intrinsèques des formations géologiques (densité, aimantation, résistivité ou conductivité électrique, etc.) résultent le plus souvent des effets combinés de différentes propriétés des terrains constitutifs telles que

leur état d'altération et/ou de fracturation, leur teneur en eau, leur porosité, leur nature chimique, leur granulométrie, etc. Il en résulte qu'une même valeur de paramètre géophysique, par exemple la résistivité électrique, peut correspondre à des terrains de nature très variée ; en corollaire, un terrain de nature donnée peut présenter des variations très importantes de ce même paramètre, jusqu'à plusieurs ordres de grandeur (x10, x100, etc.).

Principaux éléments de l'histoire géologique complexe du site de Gergovie

Le plateau de Gergovie, d'origine volcanique, est situé à quelques kilomètres au sud de l'agglomération de Clermont-Ferrand. Il culmine à 744 m et domine la plaine de

Limagne de plusieurs centaines de mètres. La zone sommitale du plateau constitue une zone tabulaire, relativement plane, de forme rectangulaire orientée est-ouest, d'une longueur d'environ 1,5 km pour une largeur moyenne (dans le sens nord-sud) de 500 à 550 m environ. Le plateau est formé par un entablement basaltique d'âge Miocène inférieur daté à 16 millions d'années (Cheguer 1996). Cette coulée de lave a "fossilisé" une histoire géologique locale et régionale complexe, au cours de laquelle se succèdent et se combinent différentes phases d'activités volcaniques et sédimentaires.

Les travaux récents (Degeai et Pastre 2008 ; Ly 2018, 2020) ont établi la présence de trois maars¹ imbriqués et/ou superposés, séparés par différentes phases et processus de sédimentation et d'érosion (**Figure 1**).

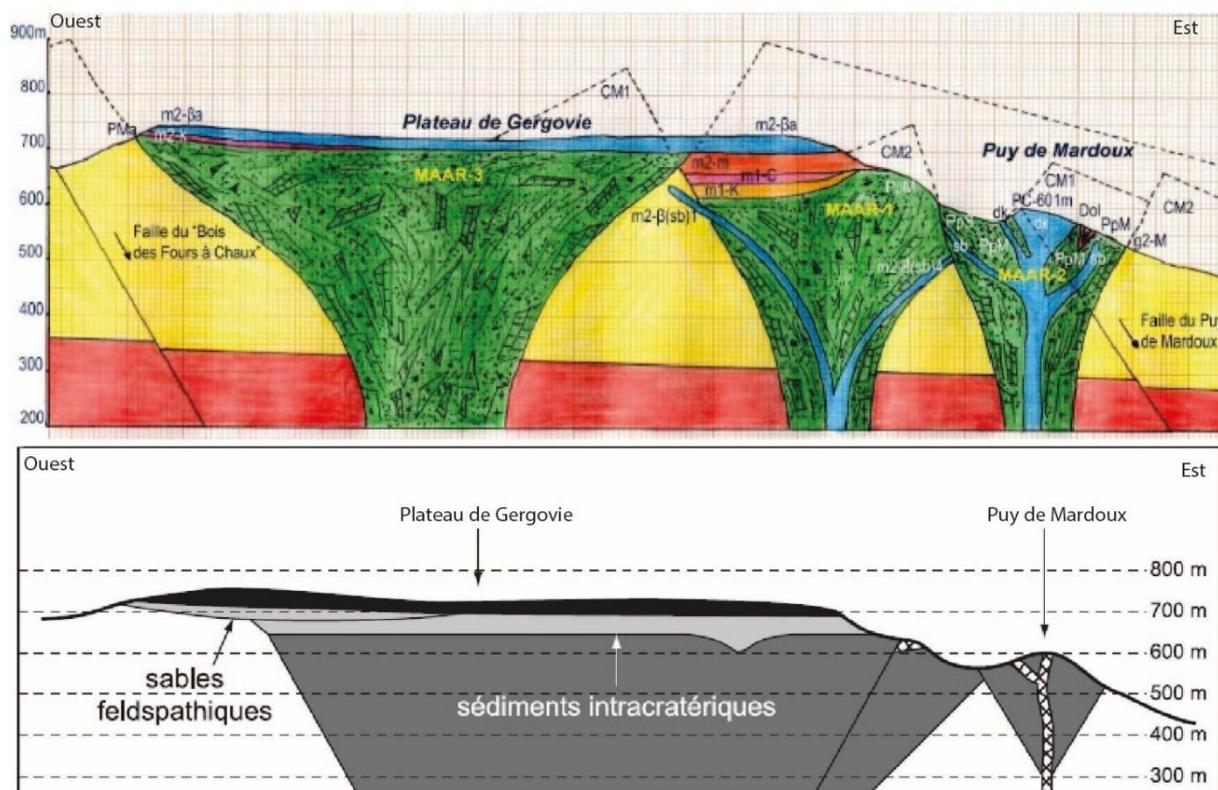


Figure 1 : Les coupes ouest-est du plateau de Gergovie d'après Ly (2020) (en haut) et Degeai et Pastre (2008) (en bas).

D'un point de vue chronologique (**Figure 2**), l'Oligocène (de 37 à 23 millions d'années) est marqué par une sédimentation lacustre peu

profonde (marnes, calcaires marneux). L'environnement de dépôt de cette période est directement contrôlé par la formation du fossé

¹ Maar : cratère d'explosion d'origine phréatomagmatique (diamètre de plusieurs centaines

de mètres) occupé par un lac ou comblé par des sédiments

d'effondrement (ou graben) de Limagne dont l'origine est liée à une phase tectonique d'extension majeure de la croûte continentale de l'ouest de l'Europe appelé Rift Ouest Européen (Merle et al., 1998 ; Merle et Michon, 2001).

À la transition entre l'Oligocène et le Miocène, la subsidence liée au rifting diminue en Limagne. Elle s'accompagne d'une diminution de la surface de l'environnement lacustre de dépôt (Hugueney et al., 1999). Le lac de Limagne persistant au miocène inférieur est un cordon d'une dizaine de kilomètres de large et de 70 km de long depuis la région de Moulins au nord jusqu'à Saint-Saturnin au sud.

Durant le Miocène inférieur (23 millions d'années), une première éruption phréatomagmatique se produit dans le secteur oriental du plateau actuel, formant un diatrème² associé à des dépôts de pépérites³. Cette première phase éruptive (**Figure 2**) se produit dans un milieu lacustre de faible profondeur (10 à 20 m, Hugueney et al., 1999).

Entre 22 et 19,5 millions d'années, ce cratère de maar est progressivement comblé par un remplissage sédimentaire lacustre constitué de grès volcanique, de calcaires fossilifères et de formations marno-calcaires dont la séquence sédimentaire se termine par des marnes à Mélanies⁴ (Momot, 1965).

Le secteur connaît ensuite une deuxième éruption phréatomagmatique, entre 18 et 17 millions d'années (**Figure 2**), qui forme le maar du puy de Mardou, observable aujourd'hui sur le versant oriental du plateau de Gergovie. En raison de l'épuisement de l'eau disponible durant l'éruption, la fin de l'activité devient purement magmatique. L'accumulation de scories et de bombes plus ou moins soudées a formé un édifice dont la cheminée est aujourd'hui dégagée par l'érosion au niveau des Rocs Rouges. Des intrusions basaltiques (remontées de magma sous forme de filons) sont identifiées sur différents secteurs, sur les flancs du plateau,

comme le sill⁵ de Gergovie ou le dyke⁶ du puy Mardou. L'origine génétique de ces intrusions basaltiques fait aujourd'hui encore l'objet de travaux et de discussions. Quoi qu'il en soit, ces intrusions sont très vraisemblablement à relier à l'une ou l'autre des différentes activités éruptives qu'a connu le site de Gergovie. Pour information, Chazot et Mergoïl-Daniel (2012) ont montré que le magma responsable de l'éruption du puy Mardou présente une composante carbonatitique claire, ainsi qu'un mélange de magmas, tandis que Valentine et van Wyk de Vries (2014) l'ont interprété comme l'intrusion de lave dans des sédiments mous.

Une troisième phase éruptive de nature phréatomagmatique a lieu entre 17 et 16,5 millions d'années (Burdigalien supérieur, **Figure 2**), dans le secteur central du plateau de Gergovie, donnant là encore naissance à un maar avec un diatrème et produits pépéritiques associés. Cette phase éruptive s'est produite dans un contexte de transition entre l'arrêt de la sédimentation lacustre liée au rifting et le développement d'un réseau hydrographique dans la plaine de Limagne. La dépression laissée par l'éruption de la phase 3 a ainsi été partiellement comblée par des dépôts alluvionnaires et dépôts volcaniques remaniés (sables feldspathiques ou des sables à chailles ; Jeambrun et al., 1973)

La fin de l'histoire volcanique est marquée vers 16,5 millions d'années par l'épanchement de la coulée de basanite⁷, qui forme aujourd'hui un entablement constituant l'actuel sommet du plateau de Gergovie (Cheguer, 1996 ; Ly, 2018). Lors de sa mise en place, la coulée du plateau de Gergovie a probablement suivi le réseau hydrographique mis en place depuis l'éruption à l'origine du maar 3.

Les mécanismes et processus d'érosion ultérieurs vont ensuite remodeler les paysages, depuis la fin du Miocène jusqu'à aujourd'hui. À partir du Pliocène supérieur (3 Ma), l'accélération du soulèvement généralisé de la

² Diatrème : cheminée volcanique remplie de pyroclastites et de filons de lave

³ Pépérites : formation pyroclastique (ici : mélange de basalte et de substratum marno-calcaire) issue de la pulvérisation du substratum sédimentaire lors d'une explosion phréatomagmatique

⁴ Mélanies : mollusques de l'ère tertiaire fossilisés (cônes très allongés)

⁵ Sill : intrusion horizontale de magma entre des formations géologiques préexistantes ("filon-couche")

⁶ Dyke : intrusion magmatique verticale traversant les formations géologiques préexistantes (=filon vertical)

⁷ Basalte déficitaire en silice

région (Michon et Merle, 2001) a accru considérablement l'incision du réseau hydrographique, provoquant le déblaiement des roches sédimentaires tendres du bassin de Limagne. L'entablement volcanique sommital qui constitue le plateau de Gergovie est davantage résistant à l'érosion que le substratum sédimentaire, les dépôts pépéritiques et leurs remplissages sédimentaires. Il a ainsi protégé les roches plus tendres sous-jacentes tout en passant graduellement d'un point bas au Pliocène (creux topographique dans lequel s'est

épanchée la coulée) à un point haut actuel (plateau surplombant l'environnement sédimentaire érodé).

Ce phénomène d'inversion des reliefs volcaniques, très commun en Limagne, est à l'origine des structures tabulaires d'orientation globalement est-ouest, formant des mesas⁸ basaltiques, comme le plateau de Gergovie, la Montagne de la Serre, le plateau de Corent (Greffier et al., 1980) ou les Côtes de Clermont et le plateau de Châteaugay/Malauzat au nord de l'agglomération clermontoise.

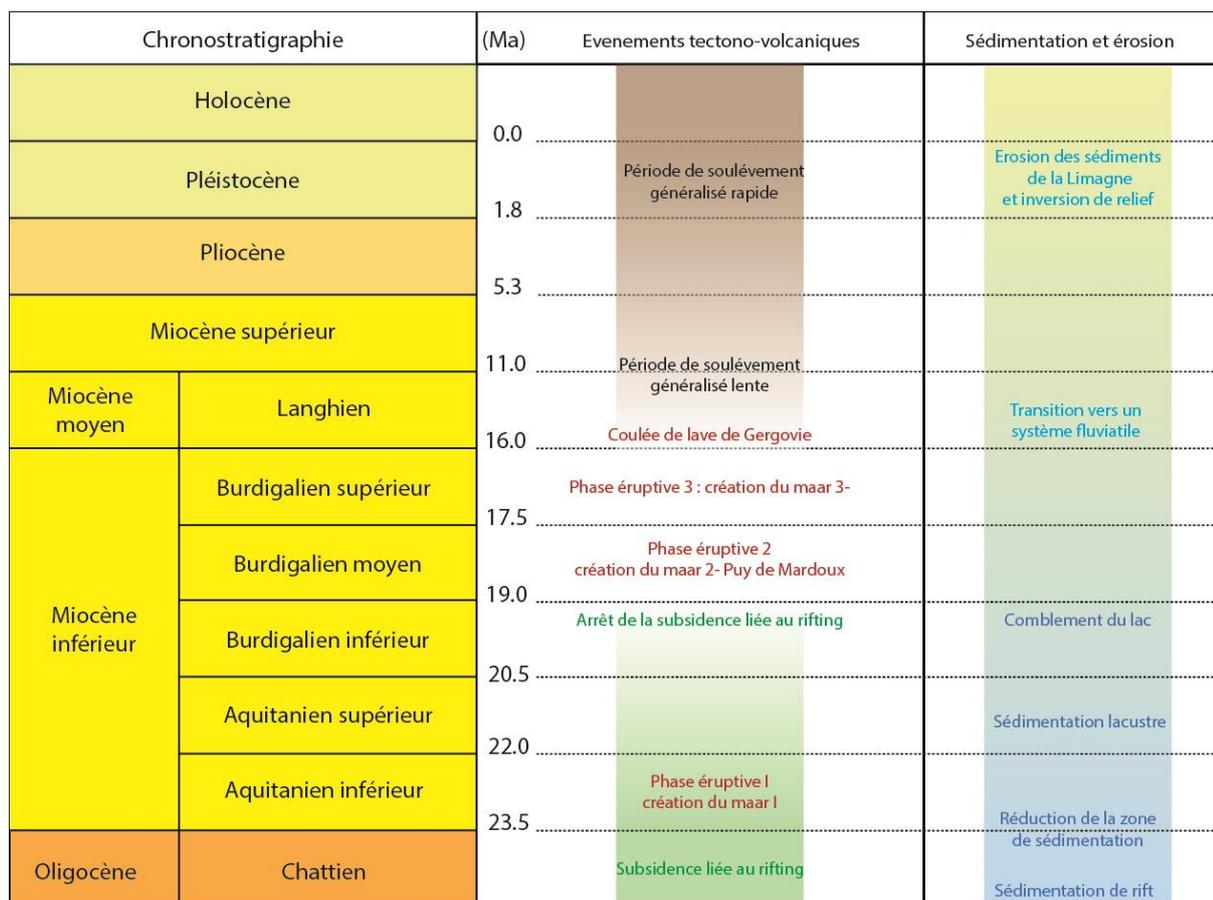


Figure 2 : Déroulement des événements dans le secteur du plateau de Gergovie (d'après Hugueney et al., 1999 ; Michon, 2000 ; Degeai et Pastre, 2008 ; Ly, 2020).

Synchrones de ces phénomènes d'érosion continue depuis le Pliocène, des phénomènes de glissements de terrain de grande ampleur se produisent (Greffier et al., 1980 ; Vidal, et al., 1996 ; Vidal et De Goër, 2001). Ces glissements gravitaires impliquent des volumes de taille variée, de quelques dizaines de mètres cubes

jusqu'au million de mètres cubes. Ces glissements, parfois de nature catastrophique (glissements rapides), ou avec une cinétique plus lente, sont responsables de la topographie en gradins des versants nord et sud des mesas basaltiques. Des phénomènes actuels et subactuels de colluvionnement et de

⁸ Mesa : petit plateau formé par inversion de relief

solifluxion (à l'origine des formations superficielles) mais aussi de ravinement (Ravins de Vazilhat, de Macon, etc.), rendent plus complexe encore la lecture géomorphologique des paysages dans la topographie actuelle (Mayoral et al., 2021).

La morphologie de la coulée sommitale présente une cassure ou une flexure de direction SSW-NNE, dont l'origine et l'âge restent à définir, mais dont la marque est bien

visible dans la topographie. Elle découpe le plateau en deux parties, une partie occidentale avec une pente de 1% vers l'est et une partie orientale relativement plate avec un léger bombement sur sa bordure sud (**Figure 3**).

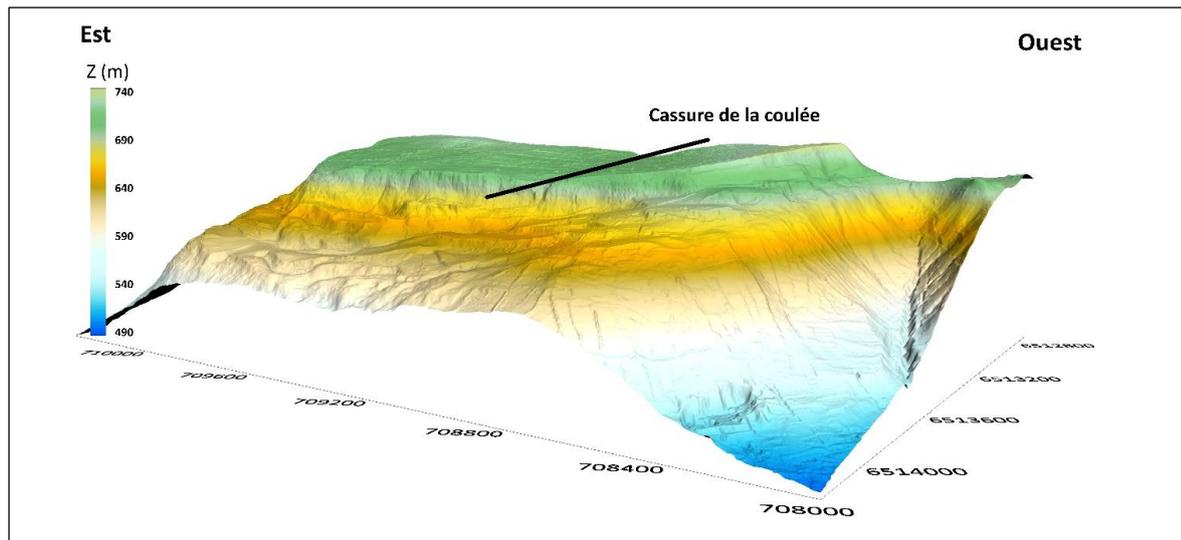


Figure 3 : Vue 3D du versant nord du plateau de Gergovie. La cassure discutée dans le texte est visible en noir sur l'image. Il est possible de remarquer les marches d'escaliers matérialisant les déstabilisations de flancs de la mésa et le ravin partant de l'extrémité ouest du plateau

L'origine et l'âge de cette cassure ou flexure devront être comparés à d'autres systèmes locaux d'inversion de relief, notamment le plateau de Châteaugay/Malauzat qui présente le même phénomène mais plus marqué. De plus, l'entablement basaltique, les alluvions sous coulée et possiblement le remplissage volcano-sédimentaire des maars constituent un important aquifère dont le fonctionnement hydraulique et les résurgences devront être pris en considération.

Imagerie géophysique multi-méthodes : principes et mises en œuvre

Au cours des années universitaires 2020 et 2021, plusieurs campagnes de prospection géophysique ont été menées sur le plateau de Gergovie, dans le cadre d'actions d'initiation et de formation aux méthodes géophysiques à destination des étudiants de Master de l'École de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont (Université Clermont Auvergne) et d'étudiants du Master de Sorbonne Université (Paris). Au cours de ces différents stages, 6 tomographies de résistivité électrique, 27 sondages électromagnétiques ainsi qu'une cartographie des anomalies magnétiques ont été réalisés. (**Figure 4**).

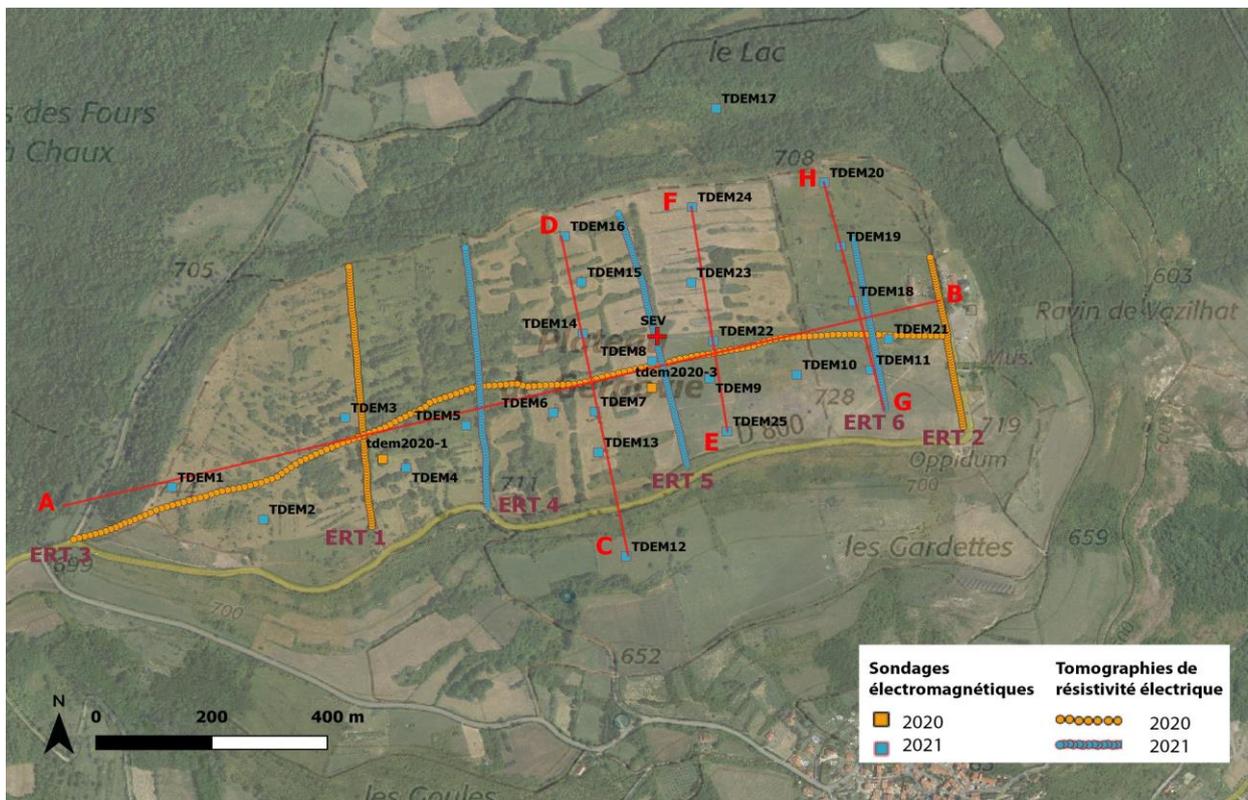


Figure 4 : Localisation des reconnaissances géophysiques (2020 en orange, 2021 en bleu) sur le plateau de Gergovie. ERT = Profils de Tomographie de résistivité électrique ; TDEM = Sondages électromagnétiques. Les traits de coupe en rouge, notés A-B, (d'orientation est-ouest) et C-D, E-F et G-H (d'orientation nord-sud), correspondent aux profils géophysiques présentés sur la Erreur ! Source du renvoi introuvable.. Une cartographie magnétique de l'ensemble du plateau a également été réalisée.

2.1. Méthode électrique à courant continu

La grandeur mesurée par la méthode électrique est la résistivité électrique, définie en ohm.mètre (Ωm). Elle caractérise la capacité d'un matériau ou d'un terrain à s'opposer au passage d'un courant électrique (c'est-à-dire l'inverse de la conductivité électrique). Il s'agit d'une propriété particulièrement intéressante pour les études géologiques car elle présente de très forts contrastes en fonction de la nature des terrains, notamment en contexte volcanique et elle est très sensible à la présence d'aquifères. De plus, les nombreux dispositifs et protocoles de mesures existants permettent d'acquérir des données plus ou moins denses et à différentes échelles spatiales, suivant la profondeur d'investigation et la résolution recherchées.

Le principe de la méthode (Figure 5) consiste à injecter un courant électrique à l'aide de deux électrodes (piquets métalliques) implantées à la surface du sol et à mesurer, à l'aide de deux autres électrodes, la différence de potentiel ou tension (exprimée en Volts, V) générée par le passage du courant dans le sous-sol. La

disposition relative des quatre électrodes nécessaires à une mesure conditionne la profondeur d'investigation et la valeur du coefficient géométrique qui lie l'intensité du courant injecté et la tension mesurée à la résistivité électrique. En une dimension (1D), on parle de sondage électrique vertical (SEV), qui permet, après modélisation, de déterminer les épaisseurs et les propriétés électriques des différentes couches du sous-sol à l'aplomb d'un point unique (i.e. le centre du dispositif). En deux dimensions (2D), un grand nombre de mesures sont réalisées au cours d'une même série de mesures, à l'aide d'un dispositif multi-électrodes (64 électrodes dans le cas de nos investigations), implantées le long d'un profil. Plusieurs centaines de mesures sont réalisées sur chaque profil, par permutation des électrodes, qui peuvent servir alternativement à l'injection de courant ou à la mesure de tension électrique. On parle alors de tomographie de résistivité électrique qui permet de décrire en 2D la distribution de la résistivité en fonction de la profondeur à l'aplomb du profil.

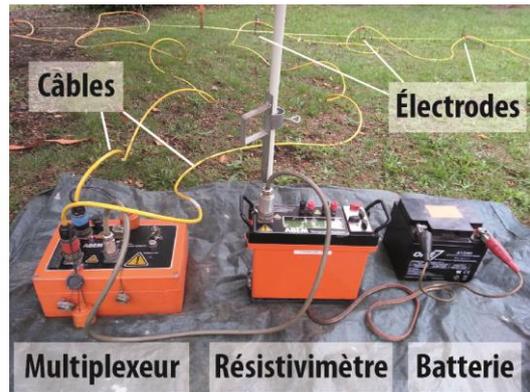
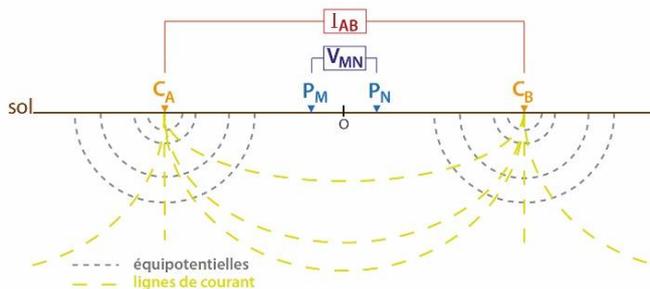


Figure 5 : Principe de la méthode électrique ; photo : application en tomographie de résistivité (2D)
(Matériel : résistivimètre ABEM SAS 4000)

2.2. Sondage électromagnétique

Le sondage électromagnétique en domaine temporel ou méthode TDEM (Time Domain Electro-Magnetism) utilise le phénomène de diffusion d'un champ électromagnétique (EM) transitoire pour déterminer la conductivité électrique du sous-sol. Il s'agit d'une méthode 1D, qui fournit la distribution verticale de la résistivité électrique (inverse de la conductivité) en un point et qui constitue un excellent complément à la méthode électrique du fait de ses performances en terme de résolution verticale. En outre, sa mise en œuvre est rapide sur terrain dégagé, et peut donc aboutir, par combinaison d'une série de mesures ponctuelles, à des profils 2D ou une cartographie des caractéristiques électriques des différentes couches du sous-sol.

Le principe de la méthode (**Figure 6**) consiste à injecter, dans une boucle carrée posée à la surface du sol, un courant électrique qui génère un champ magnétique (statique) dit primaire. À la coupure du courant, le champ magnétique primaire décroît brutalement et cette variation est à l'origine de filets de courant qui circulent dans le sous-sol, dont l'intensité est fonction de la conductivité électrique des terrains. Ces boucles de

courants diffusent en profondeur avec le temps, à la manière de ronds de fumée, et sont eux-mêmes à l'origine d'un champ magnétique secondaire qui se manifeste, par le même effet d'induction électromagnétique, sous la forme d'une circulation de courant dans la boucle posée au sol. La mesure de la tension aux bornes de la boucle, à différents instants après la coupure du courant injecté, fournit la courbe de décroissance du champ secondaire en fonction du temps. La résistivité électrique du terrain est reliée aux signaux mesurés (valeurs de tensions à différents instants t) par l'intensité injectée dans la boucle pour générer le champ primaire et par la taille de celle-ci. La profondeur d'investigation croît avec la durée du temps d'écoute (jusqu'à ce que le signal devienne trop faible par rapport au bruit).

Sur le plateau de Gergovie, les sondages ont été réalisés avec une boucle de 40 m de côté, ce qui a permis d'atteindre une profondeur d'investigation estimée à une centaine de mètres étant données les conditions propices de prospection (gamme de résistivités peu élevées et présence d'une cible fortement conductrice en profondeur, i.e. substrat marno-calcaire, configuration optimale pour la méthode).

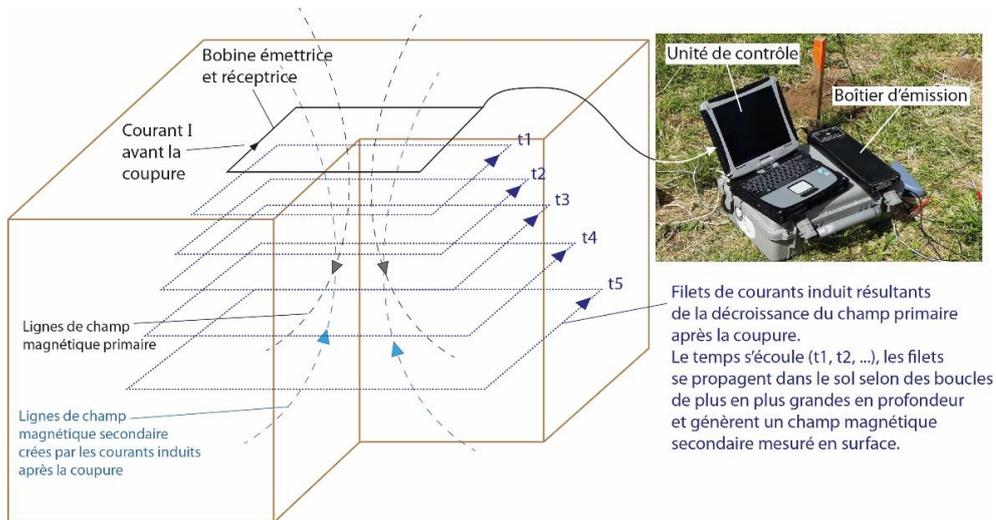


Figure 6 : Principe du sondage électromagnétique (photo : matériel TEMfast aemr)

2.3. Magnétisme

Les mesures magnétiques (mesurées en nano-Tesla, nT) s'intéressent au paramètre aimantation (exprimée en Ampère par mètre, $A.m^{-1}$) et sont communément utilisées en volcanologie pour cartographier les contacts entre des formations d'âges ou de natures différentes. Elles sont également particulièrement pertinentes pour imager les phénomènes d'altération et d'instabilité qui perturbent les anomalies locales du champ magnétique, en induisant une diminution de l'aimantation des roches et des formations volcaniques. Une couverture du plateau a été

réalisée à l'aide d'un magnétomètre portable à effet Overhauser (GSM19, GEM Systems) avec un capteur monté sur une perche à 1,8 m du sol environ, avec une très bonne résolution instrumentale de quelques nT (**Figure 7**). Ces mesures ont permis de construire une carte d'anomalies magnétiques qui représentent les différences entre les valeurs de champ mesuré sur le terrain et le champ magnétique moyen, mettant en évidence différentes structures d'intérêt géologique et archéologique.

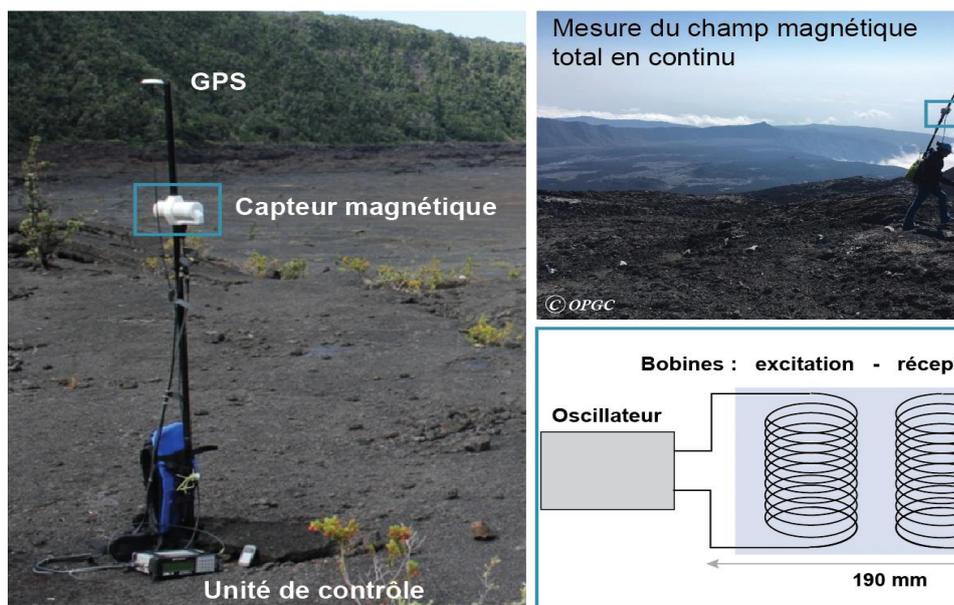


Figure 7 : Principe de mesure du champ magnétique total (matériel : magnétomètre GSM19 – GemSyste)



- 1 - Réalisation d'un profil de tomographie électrique sur le plateau de Gergovie
- 2 - Réalisation d'un sondage électromagnétique sur un replat au nord du plateau
- 3 - Formation des étudiants aux méthodes géophysiques
- 4 - Electrodes
- 5 - Mesure de la résistivité
- 6 - Electrodes



**Caractérisation de la géométrie
des unités géologiques constitutives
du plateau de Gergovie**

- Sous la coulée le maar

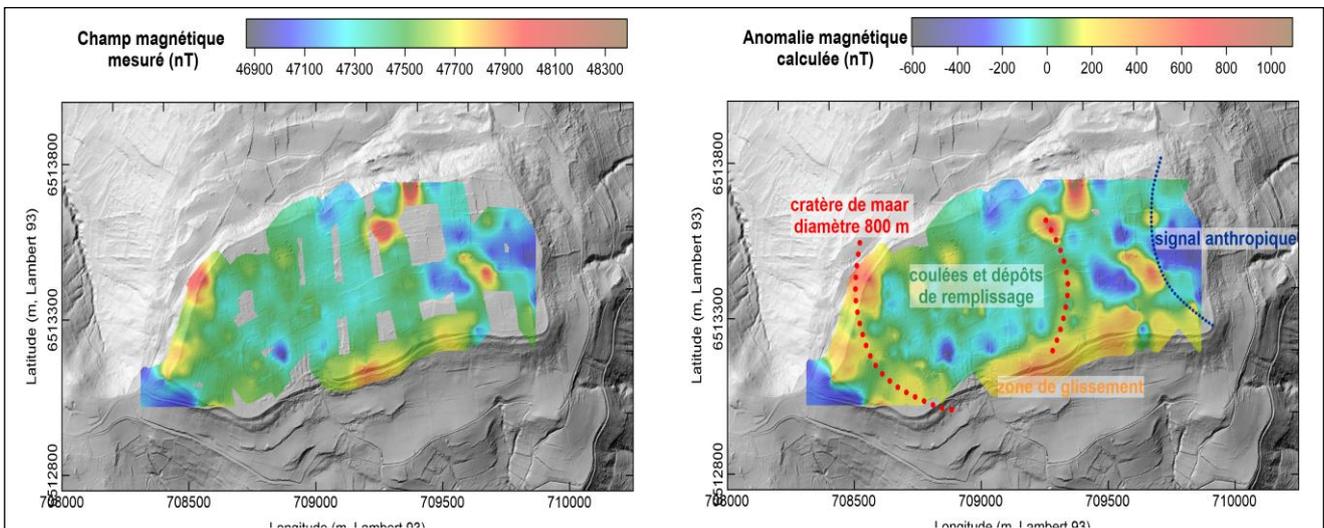
Le profil de tomographie de résistivité électrique de grande extension (près de 1600 m de long) réalisé dans l'axe de l'allongement du plateau (i.e. ouest-est ; ERT 3) offre une vue d'ensemble de la structure interne du secteur avec une grande profondeur d'investigation mais une résolution latérale limitée du fait de l'espacement inter-électrodes de 10 m. Cette tomographie électrique longitudinale (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) semble indiquer un épaississement de l'entablement basaltique au centre du plateau. En effet les valeurs de résistivité attribuables à la coulée volcanique (150-400 Ω m) contrastent avec celles des formations marno-calcaire (< 70-80 Ω m) visibles en profondeur aux extrémités de la tomographie (abscisses < 400m et > 1200 m). Cet épaississement semble confirmer la présence du maar 3 et permet une estimation de ses dimensions : le diamètre du cratère de maar serait d'environ 800 m pour une profondeur de 60 m. Cette profondeur (cote altimétrique de 655 m NGF) demeure approximative du fait de la présence potentielle d'un comblement sédimentaire du cratère, invisible par l'imagerie géophysique car potentiellement trop peu épais, et qui serait dû à un épisode de dépôt post édification du maar.

La couronne d'anomalies magnétiques positives (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) suggère également la présence d'une telle structure avec un fort contraste d'aimantation au niveau du diatrème.

Une partie du signal magnétique est à relier à l'existence d'effets anthropiques actuels. D'autres anomalies semblent attester de la présence de différents types de structures, à plus ou moins grande profondeur : i) les courtes longueurs d'ondes "positives", délimitées et géométriques, pourraient être reliées à des structures archéologiques et ii) les plus grandes longueurs d'onde, notamment en bordure sud de plateau pourraient marquer des structures de glissement en lien avec les évidences topographiques ou, alternativement, des remplissages de dépressions par des dépôts massifs comme des empilements de coulées par exemple. Les anomalies négatives pourraient quant à elles suggérer des phénomènes de remaniement ou d'altération dont les processus restent à identifier.



Figure 8 : Champ magnétique mesuré et anomalies magnétiques calculées à l'échelle du plateau de Gergovie. Les valeurs magnétiques, exprimées en nano-Tesla (nT), sont représentées avec une échelle de couleurs, depuis les teintes bleues (faibles valeurs) jusqu'aux teintes en rouge (valeurs élevées).



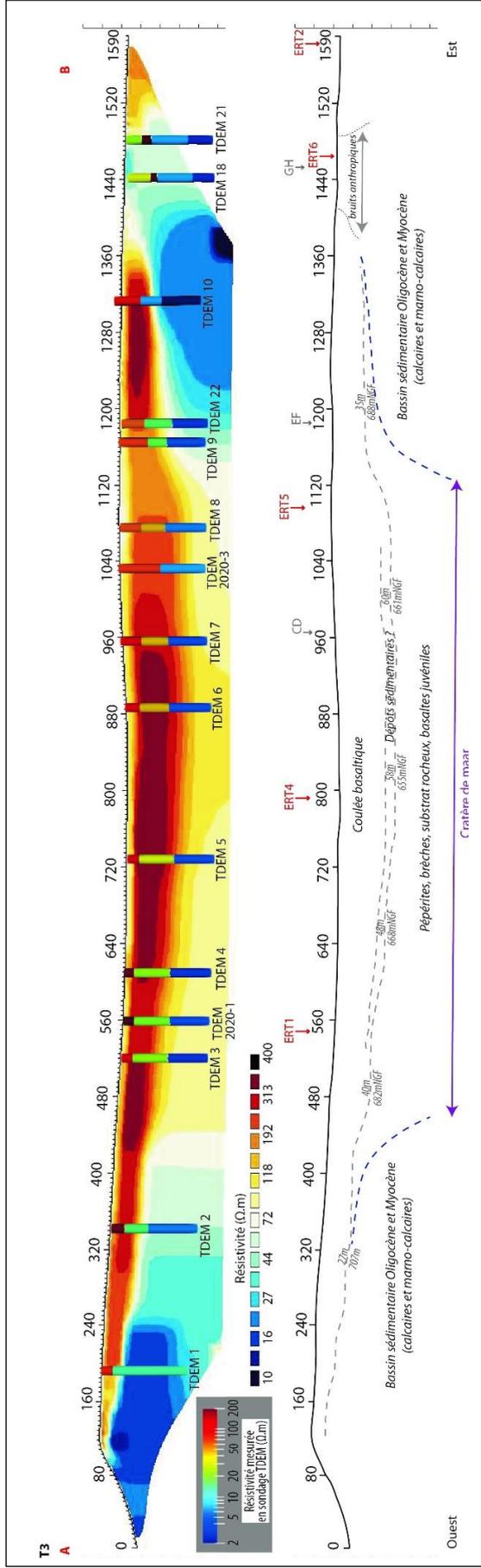


Figure 9 : a) Tomographie de résistivité électrique longitudinale (ouest-est) du plateau de Gergovie incluant les résultats de sondages TDEM (Localisation des dispositifs sur la Figure 4) ; b) Interprétation du modèle géoélectrique

- Épaisseur de l'entablement basaltique

Cette imagerie grande échelle a été précisée par des profils sud-nord transverses à l'allongement du plateau (**Figure 4 et Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), offrant une meilleure résolution spatiale, en contrepartie d'une profondeur d'investigation limitée à environ 50 mètres. Ainsi, les tomographies de résistivité électrique ERT 1 et 4 au centre du plateau n'ont pas permis d'atteindre les formations sédimentaires conductrices profondes et confirment, avec des valeurs de résistivité principalement comprises entre 150 et 400 ohm.mètre, l'épaisseur d'au moins 50 m du recouvrement basaltique dans le cratère de maar. L'ERT 5, moins centré sur le cratère de maar laisse apparaître en profondeur (~50 m) le niveau conducteur correspondant au substratum sédimentaire ; ce niveau conducteur est également visible sur le sondage électrique (SEV) réalisé en 2020. Les tomographies ERT6 et ERT 2, même si impactées par la présence d'une anomalie conductrice en surface qui semble être d'origine anthropique (les anomalies magnétiques négatives sont également particulièrement bruitées dans ce secteur), suggèrent un amincissement du recouvrement basaltique en allant vers l'extrémité orientale du plateau.

- Des observations sur le terrain, indispensables à l'interprétation des données géophysiques

Les mesures géophysiques nécessitent de s'appuyer sur des données directement observables pour contraindre et préciser les interprétations géologiques effectuées à partir des modèles géophysiques. Les logs des forages, à l'emplacement actuel du musée (*voir ERT 2 ; Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) ont indiqué une vingtaine de mètres de basalte fissuré en surface, une couche d'argile ocre inframétrique puis les marnes argilo-calcaires jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. Par ailleurs, les observations d'affleurements sur le versant Est, à l'occasion d'un travail de cartographie géologique avec les étudiants, ont confirmé l'épaisseur de l'entablement basaltique (environ 16 m). Ces

données confirment l'estimation des valeurs de résistivité de la coulée basaltique, de 150 à 400 Ω m, et des formations sédimentaires sous-jacentes : inférieures à 70 Ω m. Les données "vérité-terrain", précieuses mais généralement très ponctuelles peuvent ensuite être extrapolées à l'aide des méthodes d'imagerie géophysique. Il est ainsi possible d'estimer par tomographie de résistivité électrique, l'épaisseur de la coulée, d'environ 12 à 20 m à l'extrémité orientale du plateau (ERT 2 ; *Erreur ! Source du renvoi introuvable.*), ainsi que la cote altimétrique du niveau topographique sur lequel elle s'est épanchée : ~697 mNGF.

- Des méthodes géophysiques complémentaires pour préciser le fonctionnement hydrogéologique du plateau de Gergovie

Des sondages électromagnétiques (sondages TDEM) ont permis de compléter l'imagerie 2D issue des profils de tomographie de résistivité électrique. Le niveau conducteur observable sur l'ensemble des sondages (profil A-B *Erreur ! Source du renvoi introuvable.* ; profils C-D, E-F et G-H *Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) est lié aux formations sédimentaires en bordure de maar et probablement aux produits d'explosion phréatomagmatique au centre du maar (pépérites, brèches, substrat rocheux, basaltes juvéniles). Ce niveau peut être corrélé à l'anomalie magnétique plus faible observée au centre du plateau dans sa partie plus occidentale. En effet, ces produits d'explosion, malgré leur diversité, peuvent contraster, en termes de résistivité et également d'aimantation, avec ce qui les recouvre, que ce soit l'entablement basaltique ou encore des éventuels dépôts superficiels (colluvions, sables feldspathiques, sédiments) qui ont pu se mettre en place entre la création du maar et le recouvrement par la coulée basaltique. L'atout majeur de la méthode électromagnétique étant de fournir des positions précises de cibles conductrices en profondeur, l'interface entre l'entablement basaltique et le niveau conducteur repéré sur le plateau de Gergovie a pu être localisée. Ainsi, il est possible de cartographier l'altitude

du niveau conducteur (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) vraisemblablement en lien avec le fonctionnement hydrogéologique du plateau

(Mayoral *et al.* 2021). En effet, l'altitude moyenne de ce niveau conducteur, à la cote 670 mNGF (± 18 m), laisse supposer qu'il est le

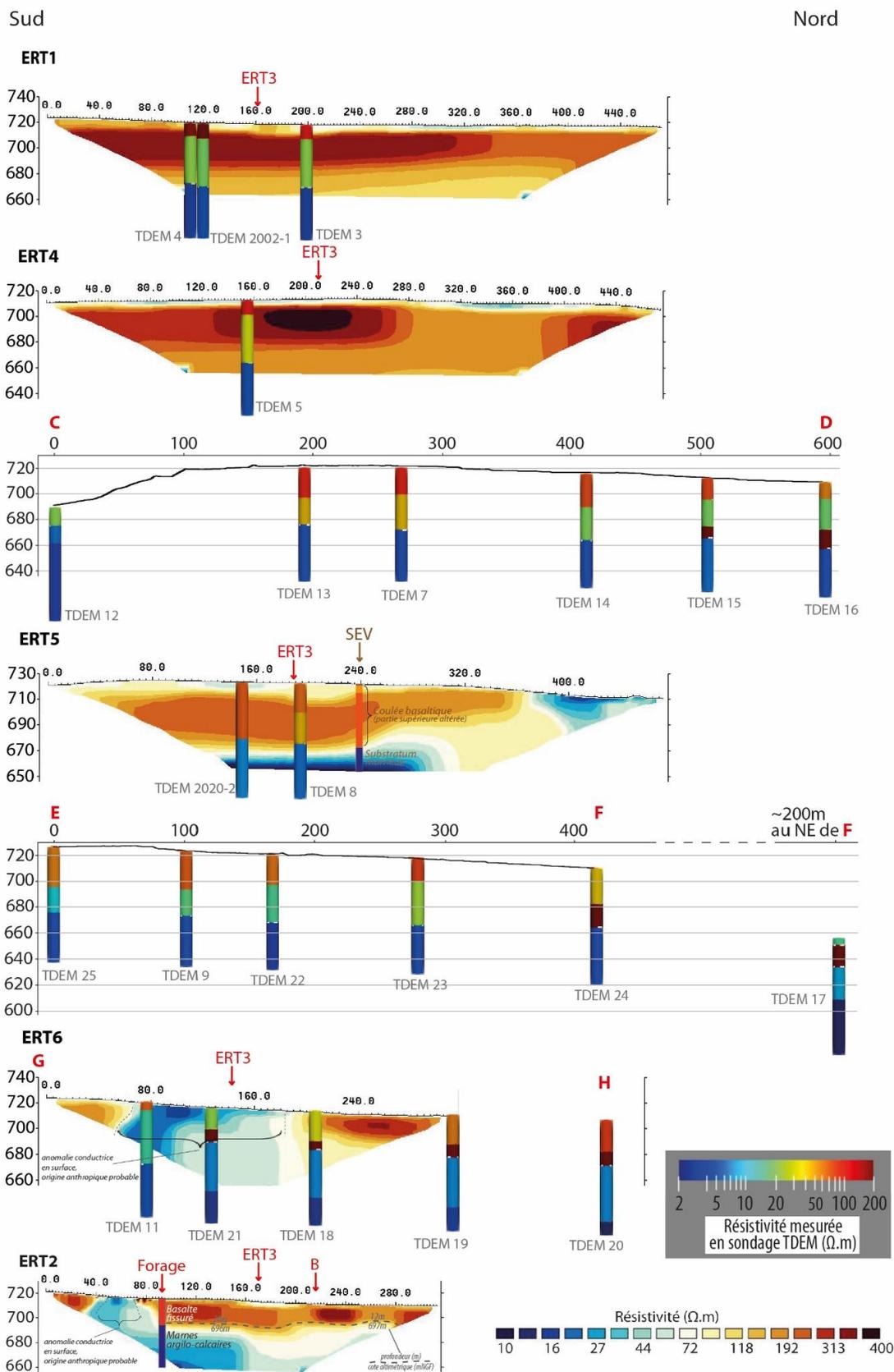


Figure 10 : Résultats, d'ouest en est, des tomographies de résistivité de direction sud-nord (ERT 1, 4, 5, 6 et 2), des transects sud-nord de sondages TDEM (alignements C-D et E-F) ainsi que du sondage électrique

vertical (SEV sur l'ERT 5) et du forage à l'extrémité Est du plateau (ERT 2). (Localisation des dispositifs sur la Figure 4.)

toit d'une nappe car les sources à proximité du plateau (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*), notamment celles de Fontmaure (versant nord) et de Gergovie (versant sud) sourdent à 675 mNGF. Enfin, ce niveau conducteur

inflexion (approximativement à l'aplomb de la cassure de la table basaltique (*Figure 3*), témoin d'une zone d'écoulement préférentiel suivant un axe plus ou moins transverse au plateau (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*).

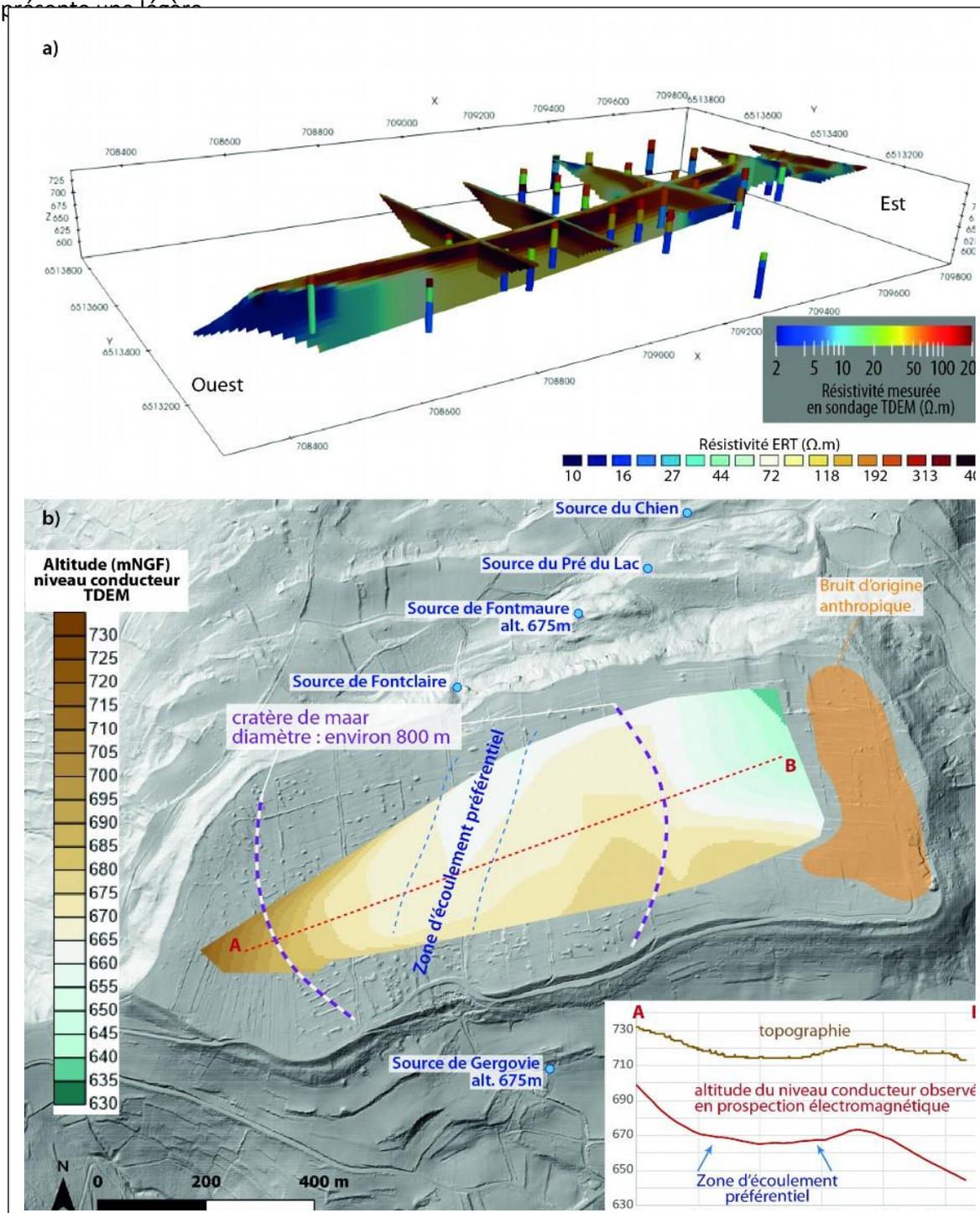


Figure 11 : Du modèle géophysique (a) à l'interprétation géologique (b) (Localisation des sources répertoriées sur les versants du plateau par P. Glangeaud, 1921-croquis) La prospection géophysique a permis de caractériser la géométrie de l'entablement basaltique, du dernier cratère de maar formé sur le plateau et de confirmer certaines hypothèses sur le fonctionnement hydrogéologique du plateau de Gergovie (Mayoral et al. 2021)

Synthèse et discussion sur la géologie du plateau de Gergovie

Les différentes investigations géophysiques multi-méthodes réalisées sur le site du plateau de Gergovie ont permis de fournir des informations essentielles sur les géométries des structures et des différentes unités et formations géologiques connues dans le secteur. Comme c'est le cas dans d'autres secteurs de la région clermontoise, l'interprétation des paysages et de la morphologie actuelle des reliefs en lien avec l'activité volcanique récente (Chaîne des Puys) et moins récente (volcanisme de Limagne, volcanisme Miocène, etc.) impose de considérer l'aspect tridimensionnel des structures mais également le paramètre temporel. Le temps en géologie est une notion compliquée à prendre en considération notamment lorsqu'il implique une succession d'événements de construction, comme les éruptions volcaniques (édifices de types et formes variés et coulées de lave et dépôts associés) et de phénomènes d'érosion (fluviale) et/ou de démantèlement (glissements, instabilités d'ampleur variée). Dans le cas du plateau de Gergovie, il est indispensable de replacer l'histoire géologique du secteur dans le contexte volcanique et tectonique régional, depuis plus de vingt millions d'années, pour la phase d'interprétation des modèles géophysiques (électriques et magnétiques).

Les résultats de ces modèles, et leur interprétation couplée, permettent de circonscrire avec un bon degré de confiance les limites de l'extension du diatrème du maar le plus récent, le maar 3 (**Figure 1**), qui occupe la partie centrale du plateau. Le diamètre du cratère, largement comblé par les dépôts de tufs phréatomagmatiques, est d'environ 700 à 800 m. L'érosion a décapé l'essentiel de l'anneau de tufs pyroclastiques externe, dont les seuls indices en place sont identifiés à l'extrémité occidentale du plateau, sous la coulée basaltique sommitale. Même s'il est impossible de reconstituer avec précision l'évolution du réseau hydrographique au cours de ces dernières dizaines de millions d'années,

il est toutefois clair que la coulée basaltique s'est mise en place dans une dépression alluviale relativement large, probablement peu incisée dans les formations sédimentaires. L'eau circulant dans ce réseau hydrographique et présente dans les aquifères intra-sédimentaires est probablement à l'origine des différents épisodes phréatomagmatiques (trois sont proposés dans la littérature récente, à partir d'études de terrain ; Degeai et Pastre, 2008 ; Ly, 2018 et 2020).

Postérieurement à l'éruption du maar 3, ce réseau hydrographique a vraisemblablement continué son action d'érosion/sédimentation, avec l'apport de produits alluvionnaires qui ont progressivement contribué à combler la dépression cratérique du maar et à démanteler l'anneau de tufs. La coulée basaltique, dont l'origine incertaine est liée, selon Pinto (1968), aux filons de Rizolle, quelques kilomètres à l'ouest du plateau de Gergovie, s'est ensuite mise en place dans une vallée creusée dans le substratum sédimentaire. Elle présente une épaisseur de l'ordre de quelques mètres sur la bordure occidentale, pour atteindre progressivement une épaisseur d'une vingtaine de mètres, 200 ou 300 m plus loin, avant de venir remplir le cratère du maar III, partiellement comblé par les sédiments alluviaux. On note en effet, un sur-épaississement de la coulée basaltique à l'aplomb du diatrème (épaisseur supposée d'une trentaine à une quarantaine de mètres environ), interprété comme le remplissage de la dépression, déjà très largement comblée probablement. La coulée continuant ensuite sa mise en place vers l'est avec une épaisseur moyenne de l'ordre d'une quinzaine de mètres. L'épaisseur de la coulée dans ce secteur a pu être confirmée par les forages géothermiques pour le musée et les affleurements dégagés puis comblés lors de travaux géotechniques (assainissement, réseaux) effectués au printemps 2021, en contrebas du monument du « casque de Vercingétorix » et du Musée de Gergovie, à l'extrémité orientale du plateau.

Les futurs travaux devront maintenant s'attacher à reconstituer l'histoire géologique complète du site du plateau de Gergovie, en couplant travaux de terrain et prospections

géophysiques complémentaires. Un des principaux enjeux de ces investigations sera de réconcilier les observations géologiques de terrain et la géomorphologie actuelle du secteur avec la complexité des relations génétiques entre les différentes éruptions phréatomagmatiques et leurs diatrèmes de maars et dépôts associés.

Il conviendra notamment de prendre en compte l'existence de dépôts sédimentaires, lacustres et alluviaux et de phénomènes d'instabilité et de glissements ayant affecté les différents versants du plateau (notamment côté nord et côté sud), depuis l'accélération de la phase de soulèvement tectonique accompagnée du déblaiement progressif des formations sédimentaires oligo-miocènes (sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur), voici quelques trois millions d'années.

Remerciements

Les campagnes de mesures ont pu être réalisées grâce aux propriétaires de parcelles, à l'Association du Site de Gergovie ainsi qu'au prêt de matériel par le CEBTP Clermont-Ferrand.

L'acquisition des données géophysiques a eu lieu dans le cadre de la formation des étudiants de 1^e année de master Géologie de l'aménagement de l'Université Clermont-Auvergne (promotions 2020 et 2021) et de 2^e année de master Géophysique/Géotechnique de Sorbonne Université (promotion 2021).

RÉFÉRENCES

Chazot G, Mergoïl-Daniel J (2012) Co-eruption of carbonate and silicate magmas during volcanism in the Limagne graben (French Massif Central). *Lithos* 154 : 130–146

Cheguer L (1996) Les laves miocènes de la Limagne d'Allier et des plateaux bordiers (Massif Central français) : caractérisation d'une série magmatique alcaline sous-saturée (Basanite-Phonolite) associée à un rift intracontinental. 206 p. Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

Degeai J-P, Pastre J-F (2008) Évolution morphostructurale du plateau volcano-sédimentaire de Gergovie au Miocène inférieur : implications géodynamiques sur la phase tardi-tectonique du rift de Limagne (Massif central, France). *Canadian Journal of Earth Sciences* 45 : 641–650

Glangeaud P (1921) Enquête hydrogéologique sur le projet d'adduction d'eau potable de la ville d'Aubière à la colline de Gergovie, Puy-de-Dôme (AUBIERE, Ed.). 9; 1 p. Imprimerie Joachim, Aubière, France

Greffier G, Restituto J (1980) Aspects géomorphologiques et stabilité des versants au sud de Clermont-Ferrand. *Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées* : 17–26

Huguenev M, Poidevin J-L, Bodergat A-M, Caron J-B, Guérin C (1999) Des mammifères de l'Aquitainien inférieur à La Roche-Blanche-Gergovie (Puy-de-Dôme, France), révélateurs de l'activité post-oligocène du rift en Limagne de Clermont. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 328 : 847–852

Jeambrun M, Giot D, Bouiller R, Baudry G, Camus G, Guyonnaud G, Weecksteen M-G, Leroy B (1973) Carte géologique détaillée de la France. 693, Clermont-Ferrand.

Ly MH (2018) Volcanisme du plateau de Gergovie. *Bulletin de l'association du site de Gergovie* : 12–41

Ly MH (2020) Le plateau de Gergovie (Massif Central Français) : phréatomagmatisme et évolution des phénomènes volcano-sédimentaires. *Géologie de la France* : 1–25

Mayoral A, Tissot N, Defive E, Miras Y (2021) L'oppidum de Gergovie. Contexte géomorphologique, paléoenvironnemental et géoarchéologique. Rapport final scientifique, GEOLAB UMR 6042 UCA-CNRS et Conseil Départemental du Puy-de-Dôme, Clermont-Fd

Merle O, Michon L (2001) The formation of the West European Rift; a new model as exemplified by the Massif Central area. *Bulletin de la Société Géologique de France* 172 : 213–221

Merle O, Michon L, Camus G, de Goer A (1998) L'extension oligocene sur la transversale septentrionale du rift du Massif central. *Bulletin de la Société Géologique de France* 169 : 615–626

Michon L (2000) Dynamique de l'extension continentale - Application au Rift Ouest-Européen par l'étude de la province du Massif Central. Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

Michon L, Merle O (2001) The evolution of the Massif Central rift : spatio-temporal distribution of the volcanism. *Bulletin de la Société Géologique de France* 172 : 201–211

Momot J (1965) Les marnes vertes du Burdigalien inférieur du plateau de Gergovie (Puy de Dôme). *Publications de la Société Linnéenne de Lyon* 34 : 56–60

Pinto K-J-M (1968) Étude sédimentologique des formations littorales du lac stampien de Gergovie. Le volcanisme de Rizolle et du Puy Giroux et leur relation avec le plateau de Gergovie. Mémoires du Diplôme d'Etudes Supérieures de Géologie, Université de Clermont-Ferrand, Clermont-Ferrand

Valentine G A, van Wyk de Vries B (2014) Unconventional maar diatreme and associated intrusions in the soft sediment-hosted

Mardoux structure (Gergovie, France). *Bulletin of Volcanology*, 76 : 807-821

Vidal N, De Goër A (2001) Le Puy d'Aubière et le glissement de Gergovie. *Bulletin de l'association du site de Gergovie* : 17–25

Vidal N, De Goër De Hervé A, Camus G (1996) Déstabilisation de reliefs, d'érosion en terrain volcanique. Exemples pris dans le Massif Central français. [Collapse of erosional relief in volcanic terrains. Examples from the Massif Central, France.]. *Quaternaire* 7 : 117–127

BUVAT Solène¹

AUMAR Cyril¹

LABAZUY Philippe¹

MERLE Olivier¹

MERCIECCA Charley¹

GAILLER Lydie¹,

DONNADIEU Frank¹,

SOURIOT Thierry¹

BOIVIN Pierre, pour la relecture¹

¹ Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, OPGC, Laboratoire Magmas et Volcans, F-63000 Clermont-Ferrand, France