Le plateau de Gergovie (Massif Central Français) : phréatomagmatisme et évolution des phénomènes volcano-sédimentaires

The Gergovie plateau (French Massif Central): phreatomagmatism and evolution of volcano-sedimentary phenomena

Méng Hour LY[1]

Géologie de la France, n° 1, 2020, p. 1-25, 32 fig., 3 tabl.

Mots-clés : maar, phréatomagmatisme, sill, dyke, pépérite stratifiée, pépérite massive

Keywords: maar, phreatomagmatism, sill, dike, stratified peperite, massive peperite

Résumé

Le phréatomagmatisme de Gergovie se compose de trois maars espacés d'environ 6,5 Ma durant le miocène inférieur. Le premier maar-1 de Gergovie-nord date de l'Aquitanien inférieur (-23,03 Ma). Puis deux remplissages sédimentaires intracratériques (Aquitanien supérieur et Burdigalien inférieur) ont lieu dans ce maar-1. Au Burdigalien moyen-inférieur, un sill basaltique est émis le long des fractures orientales du maar-1 formant une barre rocheuse nord-sud longue de 1,1 km. Ensuite deux explosions phréatomagmatiques se suivent (maar-2 du Puy de Mardoux au Burdigalien moyen-supérieur et maar-3 de Gergovie-ouest au Burdigalien supérieur). Enfin une seule entité de coulée de basanite à analcime comble le maar-3 à la fin du Burdigalien (-15,97 Ma) surmontant une mince couche de sables feldspathiques qui représentent le remplissage intracratérique du maar-3.

Abstract

The phreatatomagmatism of Gergovie consists of three maars covering a period of about 6.5 Ma during the lower Miocene. The first maar-1 of Gergovie-north dates from the lower Aquitanian (-23.03 Ma). Then two intracrateric sedimentary fillings (Upper Aquitanian and Lower Burdigalian) take place in this maar-1. In the Lower-Middle Burdigalian, a basaltic sill is emitted along the eastern maar-1 fractures forming a 1.1 km long north-south rock bar. Then two successive phreatomagmatic explosions occur (maar-2 of Puy de Mardoux in the Upper-Middle Burdigalian and maar-3 of Gergovie-West in the Upper Burdigalian). Finally, a single flow of analcime basanite fills Maar-3 at the end of the Burdigalian (-15.97 Ma) covering a thin layer of feldspar sands which represent the intracratal filling of maar-3.

1. Introduction

Le plateau de Gergovie, situé à une dizaine de kilomètres au Sud de Clermont-Ferrand, est un site géologique connu depuis le début du 19ème siècle dont les pépérites et structures phéatomagmatiques font l'objet de vives discussions. Cet article, qui reprend en le synthétisant l'ouvrage publié par M.H. Ly (2019), propose une reconstitution des différentes phases de phréatomagmatisme qui ont affecté ce site de Gergovie au Miocène inférieur et sont partiellement visibles dans le paysage à l'extrémité orientale et au sud du plateau (fig. 1 et 2).

2. Généralités

2.1 Historique sommaire

Dans ses études des pépérites (appelées aussi wackites, pépérinos, tufs basaltiques) de Gergovie (fig. 3 à 6), J. Giraud (1902) établit l'existence de différentes familles de formations géologiques associées observables sur le versant oriental du plateau (fig. 3): 1/ pépérites massives ; 2/ pépérites stratifiées - dyke horizontal (sill basaltique) ; 3/ pépérites stratifiées - dyke vertical (dyke du Puy de Mardoux). Une telle distinction annonce celle qui est désormais établie entre maar-1 et maar-2 (cf. *infra*).

R. Michel (1948, 1953) précise la structure pépéritique du plateau de Gergovie. Il décrit les pépérites comme étant des composants volcaniques intercalés dans les sédiments lacustres marno-calcaires de l'Oligocène (Fig. 7 à 12). On parle alors d'éruptions volcaniques sous-lacustres, celles-ci remonteraient au Chattien.

[1] 23, rue de Pissardant, 79000 NIORT ; lymenghour@free.fr

Manuscrit reçu le 13 septembre 2019 accepté définitivement le 7 novembre 2019

Fig. 1 (photo 01) : **Vue sur l'extrémité orientale du plateau de Gergovie** depuis le bourg de « le Crest » montrant la synthèse géologique commentée avec les datations relatives indiquées. Cette photo est prise à ONO du point-côté 489 m en bas de la route D52d, au niveau du Crest à La Roche Blanche. Elle montre essentiellement le maar-1 de Gergovie-nord coupé à droite par le maar-2 du Puy de Mardoux et à gauche par le maar-2 de Gergovie-ouest. Le bassin sédimentaire intracratérique marno-calcaire « m1-M » (BSE) est creusé dans le maar-1. Le tronçon de la coulée basaltique m2-β(sb)1 et la moitié du sill basaltique m2-β(sb)2 sont entièrement dans les terrains oligocènes « g2-M ». La stratigraphie utilisée est conforme à celle détaillée dans le tabl. 1.

Fig. 1 (photo 01): ***View of the eastern end of the Gergovie Plateau*** *from the "le Crest" village showing the geological elements commented in details in the text, with indication of their relative ages. Compare this stratigraphy with that detailed in Table 1.*

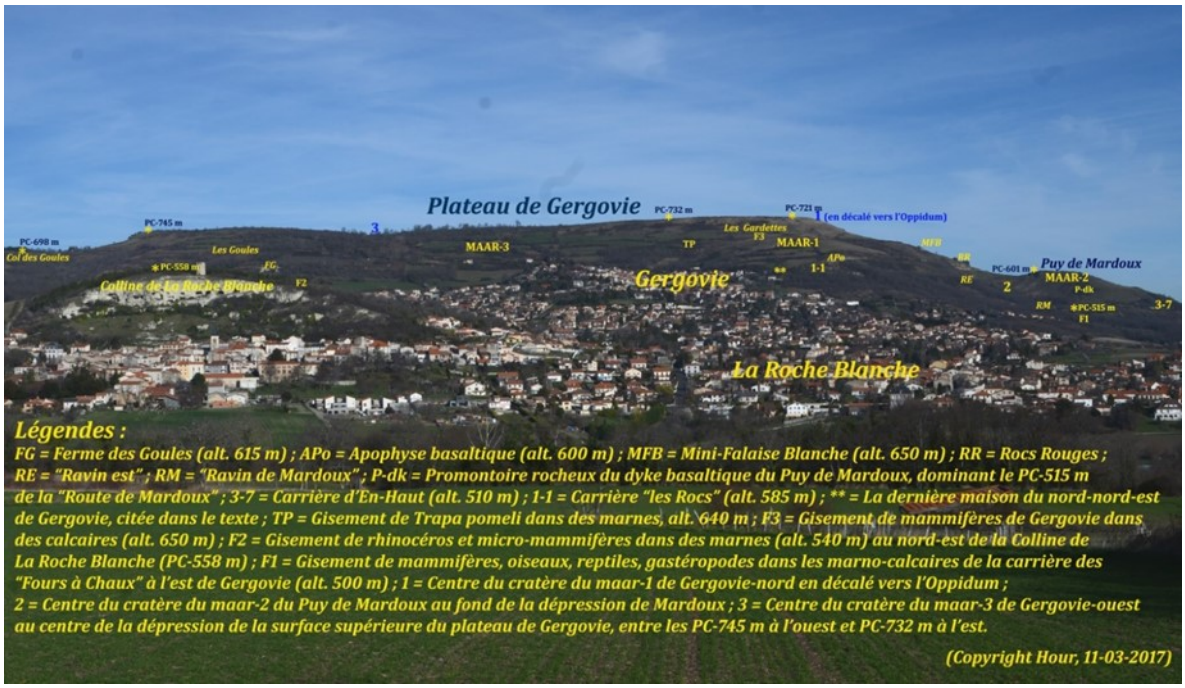


Fig. 2 (photo 02) : Vue générale du versant méridional du plateau de Gergovie prise depuis le bourg de « le Crest ». Les trois maars sont représentés, ainsi que les sites fossilifères TP, F1, F2 et F3. Le centre de la dépression du plateau (Repère « 3 ») correspond au dernier cratère de maar de Gergovie.

Fig. 2 (photo 02): General view of the southern flank of the Gergovie Plateau taken from the "le Crest" village. The three maars are exposed, as well as the fossiliferous sites TP, F1, F2 and F3. The center of the plateau depression (landmark "3") correspond to the last maar crater of Gergovie.

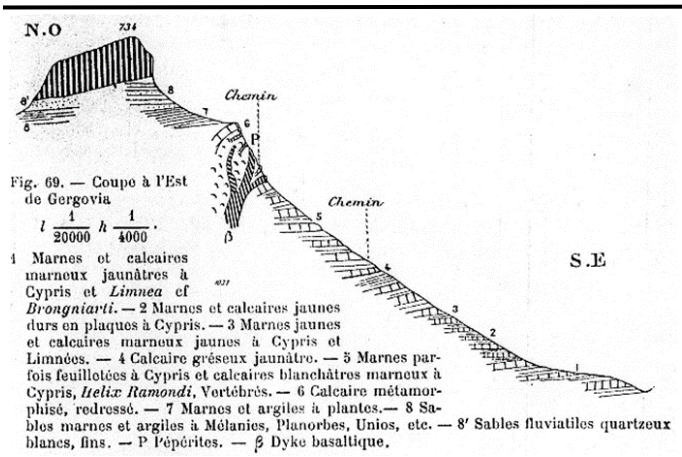


Fig. 69. — Coupe à l'Est de Gergovia

$l \frac{1}{20000}$ $h \frac{1}{4000}$.

1 Marnes et calcaires marneux jaunâtres à Cypris et *Limnea* cf *Brongniarti*. — 2 Marnes et calcaires jaunes durs en plaques à Cypris. — 3 Marnes jaunes et calcaires marneux jaunes à Cypris et Limnées. — 4 Calcaire gréseux jaunâtre. — 5 Marnes parfois feuilletées à Cypris et calcaires blanchâtres marneux à Cypris, *Itelix Ramondi*, Vertébrés. — 6 Calcaire métamorphisé, redressé. — 7 Marnes et argiles à plantes.— 8 Sables marnes et argiles à Mélanies, Planorbes, Unios, etc. — 8′ Sables fluviatiles quartzeux blancs, fins. — P. Péperites. — β Dyke basaltique.

Fig. 3 : Coupe du versant SE du plateau de Gergovie (extrait de Giraud, 1902). Selon nos observations, le « chemin du haut » serait désormais la « Rue de Prat » et le « chemin du bas » la « Route de Mardoux ».

Fig. 3: Section of the southeast slope of the Gergovie Plateau (extract from Giraud, 1902 ; p. 238). *According to our observations the upper path should be the present-day "Rue de Prat" street and the lower path should be the "Route de Mardoux" street. This section is the only where the intrusion of the basaltic sill is visible in "Rue de Prat" and whose limestone banks are straightened.*

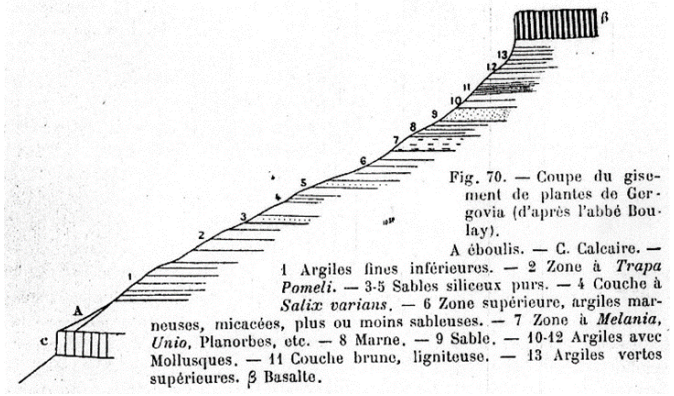


Fig. 70. — Coupe du gisement de plantes de Gergovia (d'après l'abbé Boulay).

A éboulis. — C. Calcaire. — 1 Argiles fines inférieures. — 2 Zone à *Trapa Pomeli*. — 3-5 Sables siliceux purs. — 4 Couche à *Salix varians*. — 6 Zone supérieure, argiles marneuses, micacées, plus ou moins sableuses. — 7 Zone à *Melania*, *Unio*, Planorbes, etc. — 8 Marne. — 9 Sable. — 10-12 Argiles avec Mollusques. — 11 Couche brune, ligniteuse. — 13 Argiles vertes supérieures. β Basalte.

Fig. 4 : Coupe du versant SSE du plateau de Gergovie dressée par l'abbé Boulay (in Giraud, 1902). Selon les dénominations actuelles (cf. infra), elle représente le détail des couches marneuses m2-m qui supportent directement la basanite sommitale m2-βa (« β »). Le banc « c » correspond au calcaire de l'Aquitanien supérieur m1-C, gisement fossilifère de mammifères de Gergovie retrouvé lors de la présente étude (cf. infra). Sur cette coupe, l'abbé Boulay cite 62 espèces de cryptogames, phanérogames et mollusques (Mélanies) auxquelles il attribue un âge aquitanien, qui devient burdigalien inférieur dans cette étude.

Fig. 4: Section along the SSE slope of the Gergovie Plateau established by Abbe Boulay (extract from Giraud, 1902 ; p. 240). *This section exposes the detail of the "m2-m" marly layers that directly support the basanite "m2-βa" ("β"). The unit "c" corresponds to the Upper Aquitanian limestone "m1-C" hosting the mammalian fossiliferous deposit of Gergovie. On this section, Abbe Boulay quotes 62 species of cryptogamous, phanerogamous and molluscs (Melanies) attributing them an Aquitanian age. This age is reconsidered as Lower Burdigalian in the present study.*

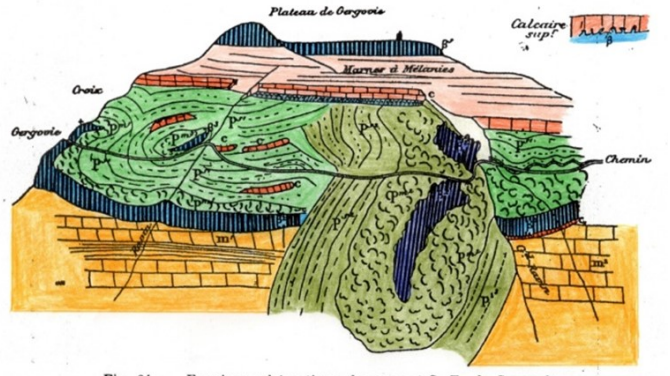


Fig. 94. — Esquisse schématique du versant S.-E. de Gergovia.

β^1 Dyke horizontal inférieur. — pm^1 Ses péperites massives. — ps^1 Ses péperites stratifiées. — β^2 Dyke basaltique vertical. — pm^2 Ses péperites massives. — ps^2 Ses péperites stratifiées. — β^3 Dyke basaltique un peu au delà de la croix. — m^1 Base du stampien supérieur. — m^1 Stampien supérieur (partie terminale). — C Calcaires redressés à 45° avec inclusions de β à la surface inférieure (La surface inférieure de ce banc est figurée séparément pour montrer les tubulures dont le fond est occupé par un fragment de basalte). β^s Basalte supérieur.

Fig. 5 : Esquisse schématique du versant SE du plateau de Gergovie selon J. Giraud (1902). Les couleurs ont été ajoutées. Le « Grand ravin » correspond au « Ravin de Vazilhat », séparant le maar-2 du Puy de Mardoux, à gauche, d'une partie du maar-1 de Gergovie-nord à droite. Selon les dénominations actuelles (cf. *infra*), le « calcaire supérieur en médaillon » et la barre horizontale « c » situées sous les « marnes à Mélanies » sont les péperites stratifiées PpS et péperites massives PpM du maar-1, respectivement. Le « dyke basaltique horizontal inférieur βi » correspond au sill basaltique m2-β(sb) ; il constitue la grande barre basaltique horizontale qui tourne au NW au niveau du croisement de la Croix de Gergovie avec β3. Le « dyke basaltique vertical β2 » est le dyke basaltique du Puy de Mardoux. Le « basalte supérieur βs » est la basanite à analcime m2-βa. Par ce schéma, J. Giraud (1902) annonce les structures maar-1 et maar-2 actuellement identifiées.

Fig. 5: Schematic interpretation of the SE slope of the Gergovie Plateau after J. Giraud (1902 ; p. 321 ; colors added). *The "Grand ravin" corresponds to the "Ravine de Vazilhat", separating the maar-2 of Puy de Mardoux (left) from part of the maar-1 of Gergovie-north (right). The "calcaire supérieur en médaillon" and the horizontal bar "c" located below the "marnes à Mélanie" correspond to the present-day massive and stratified "PpS" and "PpM" peperite of maar-1. The " dyke basaltique horizontal inférieur βi " is the basaltic sill "m2-β (sb)"; it constitutes the large horizontal basaltic bar which turns to the NW at the location where the Cross of Gergovie intersects "β3". The " dyke basaltique vertical β2" is the basaltic dike of Puy de Mardoux. The " basalte supérieur βs " is the analcime basanite « m2-βa ».*

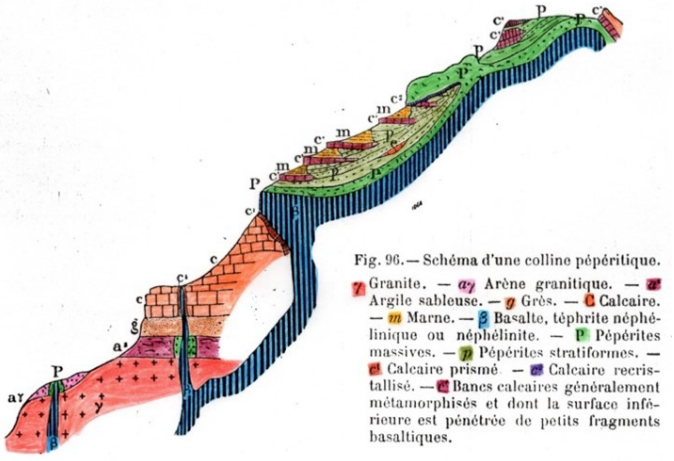


Fig. 96. — Schéma d'une colline pépéritique.

γ Granite. — $a\gamma$ Arène granitique. — a Argile sableuse. — g Grès. — C Calcaire. — m Marne. — β Basalte, téphrite néphélinique ou néphélinite. — P Péperites massives. — p Péperites stratiformes. — c^1 Calcaire prismé. — c^2 Calcaire recristallisé. — c Bancs calcaires généralement métamorphisés et dont la surface inférieure est pénétrée de petits fragments basaltiques.

Fig. 6 : Schéma d'une colline pépéritique d'après J. Giraud (1902). Les couleurs ont été ajoutées. Au contact de l'encaissant (socle granitique et terrains sédimentaires), les intrusions basaltiques (*s.l.*) ont engendré des « péperites massives P », des « péperites stratiformes p » et un métamorphisme de contact. L'auteur a également différencié les diverses formes de métamorphisme de contact dans les calcaires.

Fig. 6: Schematic interpretation of a peperitic hill after J. Giraud (1902 ; p. 364 ; *colors added). At the contact with the granitic basement and sedimentary terrains, the basaltic intrusions (s.l.) generated massive ("P") and stratiform ("p") peperites and contact metamorphism. In addition J. Giraud (1902) took into account the various forms of contact metamorphism in limestones.*

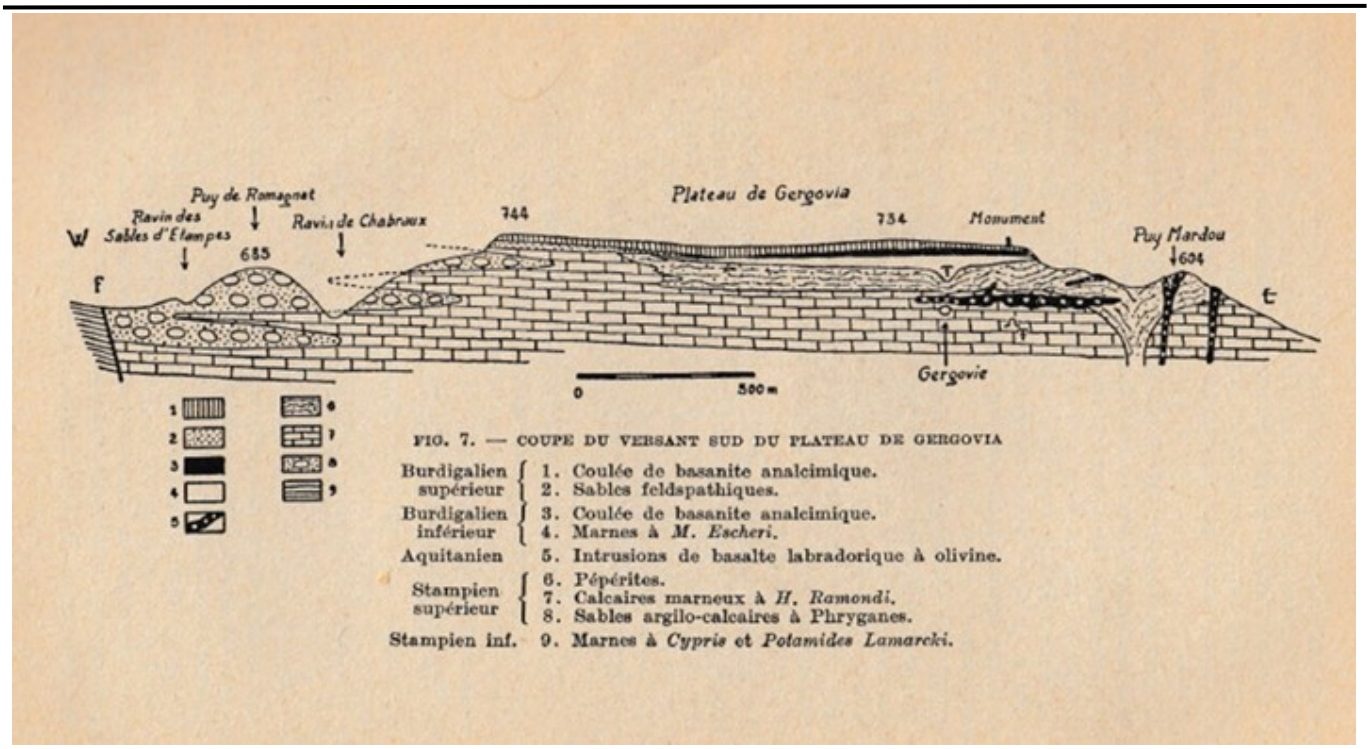


FIG. 7. — COUPE DU VERSANT SUD DU PLATEAU DE GERGOVIA

Burdigalien supérieur	1. Coulée de basanite analcimique.
	2. Sables feldspathiques.
Burdigalien inférieur	3. Coulée de basanite analcimique.
	4. Marnes à *M. Escheri*.
Aquitanien	5. Intrusions de basalte labradorique à olivine.
Stampien supérieur	6. Pépérites.
	7. Calcaires marneux à *H. Ramondi*.
	8. Sables argilo-calcaires à Phryganes.
Stampien inf.	9. Marnes à *Cypris* et *Potamides Lamarcki*.

Fig. 7 : Coupe du versant sud du plateau de Gergovie établie par R. Michel (1953). Le volcan « Puy Mardou » représente la première structure pépéritique. Le sill basaltique est représenté par le faciès 5 : « Intrusion de basalte à olivine labradorique ». Les deux « coulées de basanite analcimique » sont séparées par la couche de « sables feldspathiques ».

Fig. 7: Section of the southern slope of the Gergovie Plateau after R. Michel (1953 ; p. 82). *The volcano "Puy Mardou" corresponds to the first peperitic structure. The basaltic sill corresponds to facies 5 : "Intrusion de basalte à olivine labradorique". The two "coulées de basanite analcimique" (3) are separated by a layer of "sables feldspathiques" (2).*

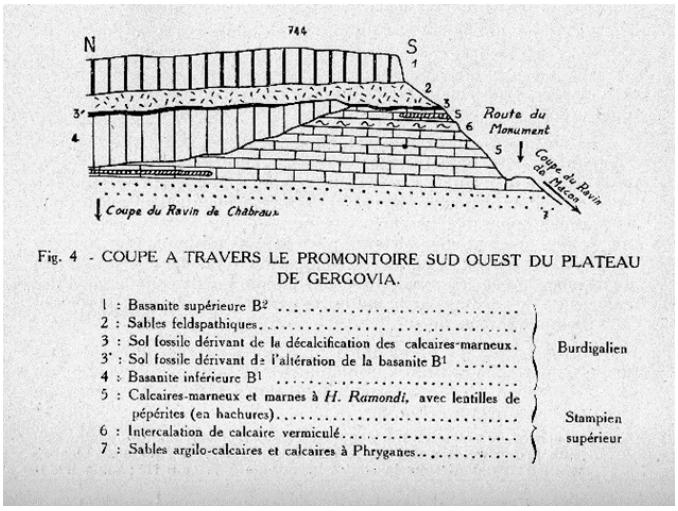


Fig. 4 - COUPE A TRAVERS LE PROMONTOIRE SUD OUEST DU PLATEAU DE GERGOVIA.

1 : Basanite supérieure B^2	Burdigalien
2 : Sables feldspathiques	
3 : Sol fossile dérivant de la décalcification des calcaires-marneux.	
3' : Sol fossile dérivant de l'altération de la basanite B^1	
4 : Basanite inférieure B^1	
5 : Calcaires-marneux et marnes à *H. Ramondi*, avec lentilles de pépérites (en hachures)	Stampien supérieur
6 : Intercalation de calcaire vermiculé	
7 : Sables argilo-calcaires et calcaires à Phryganes	

Fig. 8 : Coupe du promontoire SW du plateau de Gergovie par R. Michel (1948). Les deux coulées basaltiques B1 et B2 sont séparées par la couche de sables feldspathiques.

Fig. 8: Section through the southwestern promontory of the Gergovie Plateau after R. Michel (1948 ; p. 23). *The two basanitic flows B1 and B2 are separed by a layer of feldspathic ("Sables feldspathiques".*

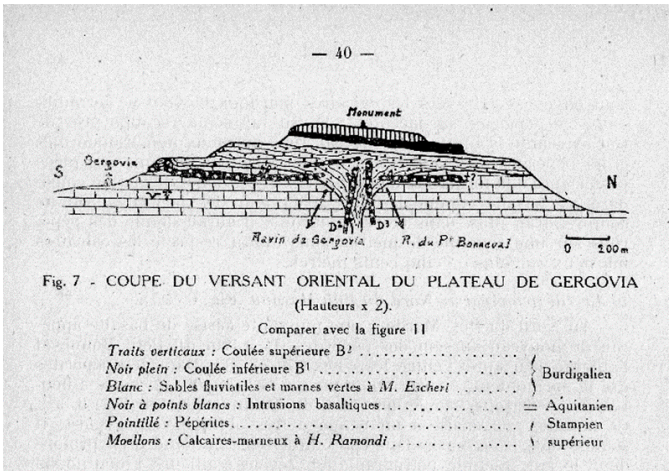


Fig. 7 - COUPE DU VERSANT ORIENTAL DU PLATEAU DE GERGOVIA

(Hauteurs x 2).

Comparer avec la figure 11

Traits verticaux : Coulée supérieure B^2	Burdigalien
Noir plein : Coulée inférieure B^1	
Blanc : Sables fluviatiles et marnes vertes à *M. Escheri*	
Noir à points blancs : Intrusions basaltiques	= Aquitanien
Pointillé : Pépérites	Stampien
Moellons : Calcaires-marneux à *H. Ramondi*	supérieur

Fig. 9 : Coupe du versant est du plateau de Gergovie par R. Michel (1948).

Fig. 9: Section of the eastern slope section of the Gergovie Plateau after R. Michel (1948).

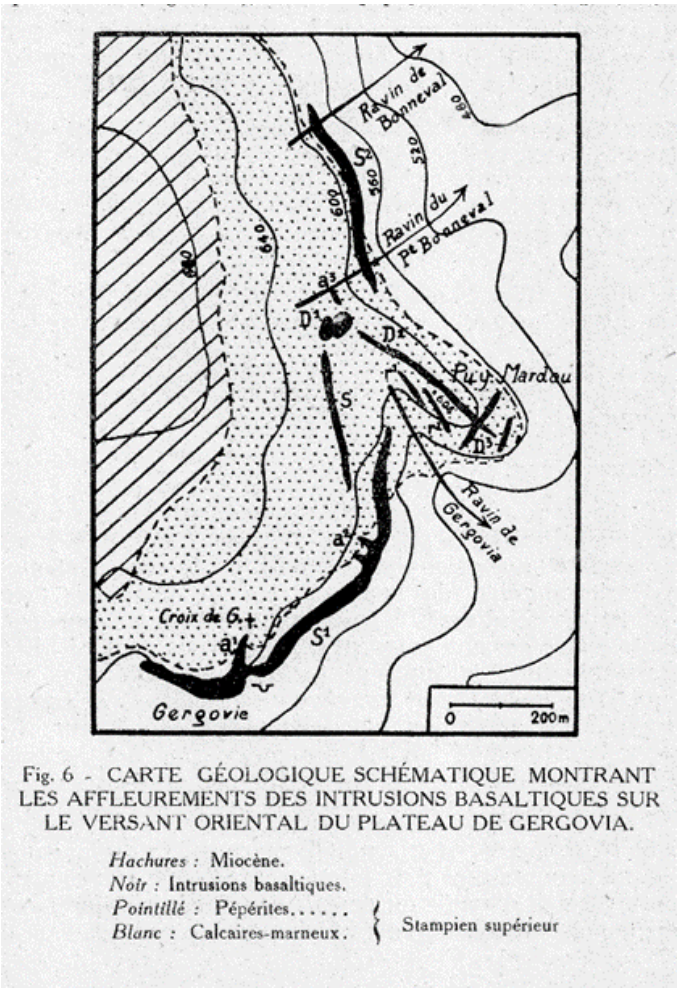


Fig. 6 - CARTE GÉOLOGIQUE SCHÉMATIQUE MONTRANT LES AFFLEUREMENTS DES INTRUSIONS BASALTIQUES SUR LE VERSANT ORIENTAL DU PLATEAU DE GERGOVIA.

Hachures : Miocène.
Noir : Intrusions basaltiques.
Pointillé : Pépérites.....
Blanc : Calcaires-marneux. } Stampien supérieur

Fig. 10 : Carte géologique schématique (Michel, 1948) montrant les intrusions basaltiques affleurant sur le versant est du plateau. Nous trouvons ici la structure du chemin « Rue de Prat » et du Puy de Mardoux décrite plus loin (cf. *infra*). Les ravins de « Pt Bonneval » et « Gergovie » correspondent respectivement aux ravins de Vazilhat et Mardoux de notre étude (cf. *infra*).

Fig. 10: Schematic geological map showing the outcrops of basaltic intrusions on the eastern slope of the Gergovie Plateau (after Michel, 1948 ; p. 33). The structure of the "Rue de Prat" path and Puy de Mardoux is well exposed. The "Ravin du Pt Bonneval" corresponds to the "Vazilhat ravine" of the present study and the "Ravin de Gergovia" is know the "Mardoux ravine".

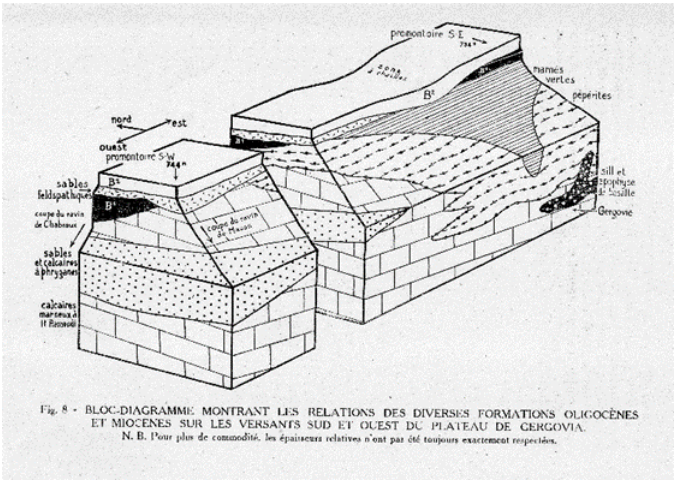


Fig. 8 - BLOC-DIAGRAMME MONTRANT LES RELATIONS DES DIVERSES FORMATIONS OLIGOCÈNES ET MIOCÈNES SUR LES VERSANTS SUD ET OUEST DU PLATEAU DE GERGOVIA.
N. B. Pour plus de commodité, les épaisseurs relatives n'ont par été toujours exactement respectées.

Fig. 11 : Bloc-diagramme montrant les relations entre formations oligocène et miocène sur les versants sud et ouest du plateau de Gergovie (Michel, 1948)

Fig. 11: Block diagram showing the relations between the Oligocene and Miocene formations on the southern and western slopes of the Gergovie Plateau (after R. Michel, 1948 ; p. 44).

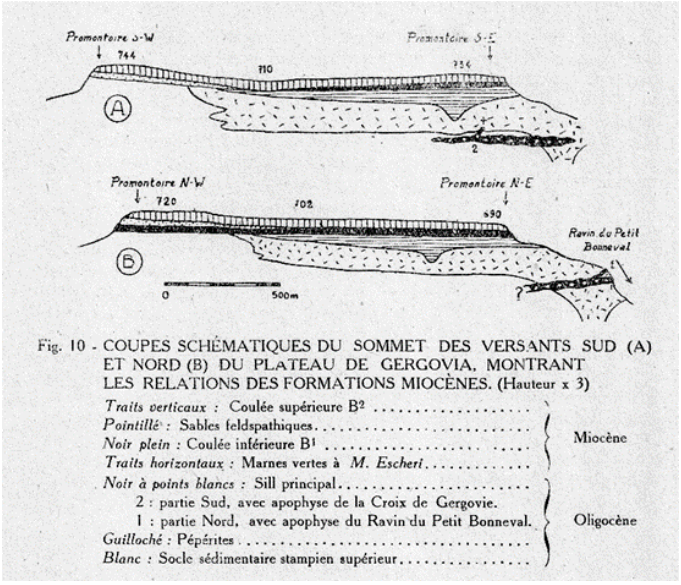


Fig. 10 - COUPES SCHÉMATIQUES DU SOMMET DES VERSANTS SUD (A) ET NORD (B) DU PLATEAU DE GERGOVIA, MONTRANT LES RELATIONS DES FORMATIONS MIOCÈNES. (Hauteur x 3)

Traits verticaux : Coulée supérieure B^2 .....
Pointillé : Sables feldspathiques..... } Miocène
Noir plein : Coulée inférieure B^1 .....
Traits horizontaux : Marnes vertes à *M. Escheri*.....
Noir à points blancs : Sill principal.....
2 : partie Sud, avec apophyse de la Croix de Gergovie.
1 : partie Nord, avec apophyse du Ravin du Petit Bonneval. } Oligocène
Guilloché : Pépérites.....
Blanc : Socle sédimentaire stampien supérieur.....

Fig. 12 : Coupes schématiques des versants sud et nord du plateau de Gergovie dressée par R. Michel (1948).

Fig. 12: Schematic sections *of the southern and northern slopes of the Gergovie Plateau de (after Michel, 1948 ; p. 51).*

Il faut attendre les années 1970, avec l'arrivée à la faculté de géologie de Clermont-Ferrand de P.-M. Vincent, pour voir proposer la troisième et la dernière théorie sur l'origine des pépérites et leurs liens avec les maars et diatrèmes phréatomagmatiques ; cette hypothèse a ensuite été unanimement adoptée. Elle est reprise par J.-M. Peterlongo et A. Goër (1978) (fig. 13) et représente la base de notre étude qui précise la structure volcanique du plateau.

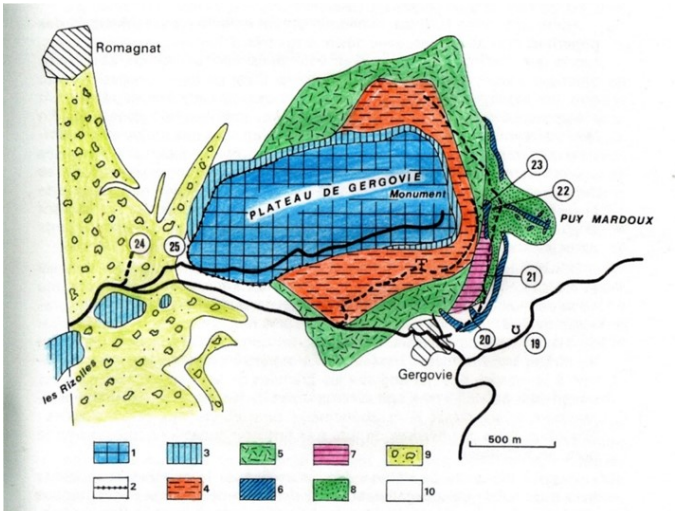


Fig. 35. – *Schéma géologique du plateau de Gergovie* (contours de R. Michel, 1953, modifiés suivant l'interprétation inédite de P. Vincent). Les chiffres entourés d'un cercle renvoient à l'itinéraire 11.
1 : Coulée basaltique supérieure. – 2 : Sables feldspathiques. – 3 : Coulée basaltique inférieure. – 4 : Deuxième remplissage sédimentaire (burdigalien). 5 – : Deuxième appareil pépéritique. – 6 : Sills, intrusions et laves scoriacées basaltiques liés au premier appareil pépéritique. – 7 : Premier remplissage sédimentaire. – 8 : Premier appareil pépéritique. – 9 : Sables et calcaires à phryganes (Stampien sup.). – 10 : Calcaires marneux (Stampien sup.).

Fig. 13 : Schéma géologique du plateau de Gergovie publié par J.-M. Peterlongo et A. Goër (1978). Les couleurs ont été ajoutées. Les auteurs proposent que le basalte des Rizolles (3) constitue la coulée la plus ancienne, affleurant de façon presque continue à la périphérie (et en dessous) de la coulée supérieure. La ligne en pointillé au milieu du dessin est le chemin vers le captage d'eau potable de Gergovie. Les affleurements encerclés sont repris dans nos descriptions (cf. *infra*). Le gisement fossilifère de Trapa pomeli (Michel, 1948), au sein de la formation 4, est indiqué selon le symbole conventionnel.

Fig. 13: Simplified geological map of the Gergovie Plateau after J.-M. Peterlongo et A. Goër (1978; colors added). According to these authors the Rizolles basalt (3) constitutes the lowest flow of the Plateau occurring almost continuously around the upper unit. The dotted line in the middle of the figure is the path to the Gergovie water capture station. The circled numbers corresponds to outcrops described further in this paper. The position of the Trapa pomeli fossiliferous deposit (Michel, 1948) in the formation numbered 4 is indicated by conventional symbol.

En 1983, Ly (inédit) propose une interprétation nouvelle supposant l'existence de trois cratères de maar (fig. 14), ceci découlant de la découverte de pépérites à l'ouest du point-côté 613 m, le long du chemin des Goules.

Suite à des échanges avec A. Goër (comm. pers.), l'existence de 3 maars-diatrèmes est envisagée :

- **le maar ancien**, le long de la « Rue de Prat », considéré par A. Goër (inédit) comme le premier maar P1 (« maar #1 » de J.-P. Degeai et J.-F. Pastre, 2008). Ce maar ancien est coupé presque entièrement par le maar central = P2 (« maar #2 »). A ce maar ancien s'ajoute à l'Ouest le maar occidental qui entoure toute l'extrémité occidentale du plateau ;
- le **maar central** P2 recouvre toute l'extrémité orientale du plateau ;
- le **maar du Puy de Mardoux** ou P3 (« maar #3 ») recoupe le maar ancien P1 au nvieau des Rocs Rouges.

En 1993, A. Goër (1993, inédit) propose la coupe schématique ci-dessous des maars orientaux de Gergovie :

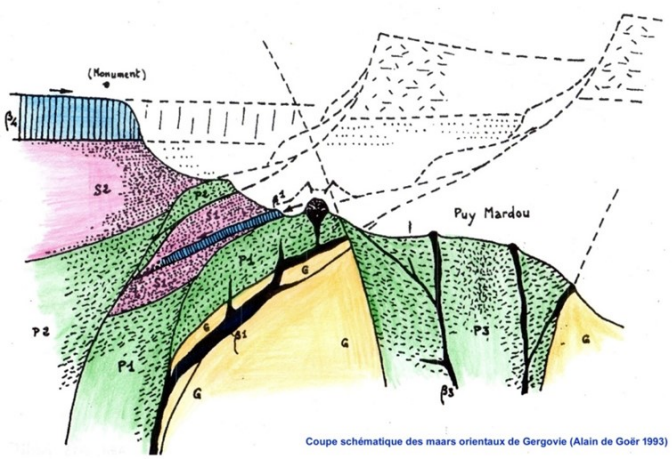


Fig. 15 : Coupe schématique des maars orientaux de Gergovie (Goër, 1993 ; inédit). Les couleurs et le titre ont été ajoutés.

Fig. 15: Schematic section of the oriental maars of Gergovie *(Goër, 1993; unpublished). Colors and title have been added.*

Par l'étude géochimique des carbonates des « pépérites de Gergovie », G. Chazot et J. Mergoil-Daniel (2012) ont montré que ceux-ci ne sont pas issus des formations sédimentaires environnantes. Par leur composition (éléments majeurs, élément traces et isotopes), leur habitus et les minéraux auxquels ils sont associés, ces carbonates apparaissent d'origine magmatique.

En 2013, une nouvelle interprétation volcanologique du plateau de Gergovie est développée par M.-H. Ly (inédit). Elle est accompagnée d'une ébauche de carte et d'une coupe ouest-est simplifiée (fig. 16) destinées à être intégrées à la carte géologique Veyre-Monton en cours de levé. L'existence du troisième maar plus jeune que les deux maars orientaux est envisagée.

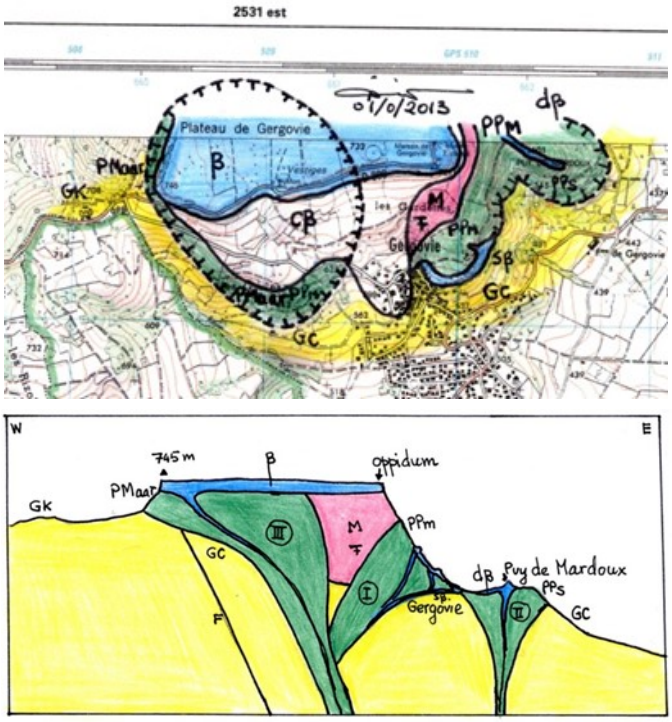


Fig. 16 : Esquisse géologique du plateau de Gergovie et coupe ouest-est (M.-H. Ly, 2013, inédit). Légende : β =Basanite noire (~ -15-19 Ma) de la coulée supérieure ; dβ = dyke basaltique ; sβ = sill basaltique ; PMaar =Produits de maar ; PPm = Pépérites massives ; PPs = Pépérites stratifiées ; M = Calcaires et marnes miocènes ; Gc =Marno-calcaire du Chattien ; Gk =Calcaire gréseux à phryganes (Chattien). I = Premier diatrème pépéritique de Gergovie ; II =Deuxième diatrème pépéritique du Puy de Mardoux ; III = Maar « Les Goules ». F = Faille affectant le substratum oligocène faisant remonter les grès calcaires à peu près de 50-80 m au-dessus des calcaires à l'Est et au Sud de Gergovie. Dans la couche « M », le gîte fossilifère du Burdigalien (reprécisé ici en Aquitanien) est indiqué par le symbole conventionnel. Ces deux dessins sont, à ce jour, obsolètes.

Fig. 16 : Draft of the geology of the northern Gergovie area in the frame of the Veyre-Monton *geological map at β = Black basanite (~ -15-19 Ma) of the upper flow; dβ = basaltic dyke; sβ = basaltic sill; PMaar = maar products; PPm = massive peperite; PPs = stratified peperites M = Miocene limestones and marls; Gc = Brown-limestone Chattian; Gk = Sandy limestone with phryganes (Chattian). I = first diatreme of Gergovie; II = second peperitic diatreme of Puy de Mardoux; III = maar "Les Goules". F = fault affecting the Oligocene strata leading to an upward movement of calcareous sandstones of approximately ~50-80 m above limestone east and south of Gergovie. In the "M" layer the site where the Burdigalian fossils (know reconsidered as Upper Aquitanian) have been discovered is indicated with conventional symbol. These two drawings can presently be considered as obsolete.*

G.-A. Valentine et B. Van Wyk de Vries (2014) décrivent l'activité basaltique du Puy de Mardoux. Ils distinguent des formations pré-Mardoux (sill méridional d'âge oligocène), détaillent la nature des produits du maar du Puy de Mardoux et ses intrusions magmatiques, et celle des formations post-Mardoux. Les intrusions basaltiques très importantes, à l'Est et au SE du Puy de Mardoux, sont interprétées comme une structure de type « spoon-shaped sill » (sill ayant la forme d'une cuillère). P.-M. Vincent (comm. pers.) qualifie ce travail de « révolutionnaire ».

Le travail présenté dans le présent article résulte de 6 campagnes de terrains menées entre 2012 et 2018 dans le cadre du levé de la feuille (Veyre-Monton, 717). Dans le cours de cette étude, plusieurs articles ont été publiés (Ly, 2016, 2018), puis deux volumineux ouvrages en français (Ly, 2019) et français-anglais (Ly, 2021, en préparation).

2.2 Définitions générales et nomenclature

La charte chronostratigraphique utilisée dans cet article et celle de K.M. Cohen *et al*. (2019).

Des formations sédimentaires et volcaniques fortement imbriquées sont impliquées pour lesquelles la nomenclature stratigraphique est décrite dans le tableau 1.

Ère	Période / Système	Époque / Série	Étage	Symboles utilisés (d'après Ly, 2019)	Âge absolu (limite inférieure en MA)
Cénozoïque Tertiaire	Néogène	Pliocène	Plaisancien	p2	-3,600
			Zancléen	p1	-5,333
		Miocène	Messinien	m6	-7,246
			Tortonien	m5	-11,63
			Serravalien	m4	-13,82
			Langhien	m3	-15,97
			Burdigalien	m2	-20,44
			Aquitanien	m1	-23,03
	Paléogène	Oligocène	Chattien	g2	-27,82
			Rupélien	g1	-33,90

Tabl. 1 : Tableau chronostratigraphique du Cénozoïque dans la zone étudiée.

Tabl. 1: Chronostratigraphic table of the Cenozoic in the studied area

La nomenclature utilisée pour chaque formation associe l'âge (étage, g1 à p2 ; tabl. 1) et la nature pétrographique principale. Pour cette dernière, les lettres suivantes sont ulisées : K - grès ; M - marno-calcaires ; R - calcaires gréseux récifaux ; C - calcaires *s.l.* ; m – marnes ; cs - brèche de calcaire silicifié ; k - sables feldspathiques ; β - basaltes *s.l.* A titre d'exemples, g2-M désigne les marno-calcaires du Chattien et m1-cs le remplissage intracratérique-1 par la brèche de calcaire silicifié de l'Aquitanien supérieur etc.

Par certains aspects cette nomenclature diffère de cette préconisée par le BRGM et adoptée pour la feuille Veyre-Monton (Chèvremont *et al.*, en préparation).

Chaque affleurement est symbolisé par « **AfX-Y** », **X** étant le numéro de circuit d'excursion et **Y** le numéro d'ordre dans ce circuit. Une soixantaine d'affleurements de Gergovie ont été étudiés et presque tous sont photographiés. Pour le site de Jussat et du Puy Giroux, chaque affleurement est symbolisé par « **AfN** », **N** étant le numéro d'ordre de Jussat au Puy Giroux. 19 affleurements de Jussat-Giroux sont décrits dans Ly (2019).

Les premières descriptions des pépérites remontent à 1827 avec la publication de « Memory on the geology of Central France, including the volcanic formations of Auvergne, the Velay and the Vivarais » par G.J. Poulett-Scrope (*in* Giraud, 1902 ; p. 299).

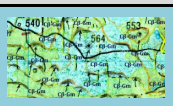
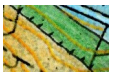
L'étude des pépérites, maars et diatrèmes est développée par B. Tricot (1975) dans sa Thèse de 3ème Cycle puis synthétisée à la lumière de la nouvelle hypothèse proposée par P.-M. Vincent dans le Guide géologique régional du Massif Central (Peterlongo et Goër, 1978 ; pp. 92-94). La genèse des pépérites est aussi évoquée par M.-H. Ly qui écrit dans sa thèse (Ly, 1982 ; p. 23) : « Après la formation du bassin oligocène, le magma basaltique arrive en surface en perçant le socle hercynien et la couverture sédimentaire qui constitue un excellent aquifère. Le magma et les formations encaissantes se mélangent intimement ; leurs débris sont projetés dans l'air, construisant un anneau de tuff (appelé tuff ring) autour de la bouche éruptive. Ce conduit de forme générale cylindrique ou ovale (pipe ou diatrème), se remplit de produits projetés, accompagnés de panneaux entiers de l'encaissant effondré par des failles circulaires bordant la structure, et d'injections de lave massive sous forme de dykes ou de sills ». Cette citation résume bien l'état des connaissances sur les pépérites qui sert de base au présent travail.

Pour la nature pétrographique, nous classons les produits pyroclastiques selon la taille de leurs composants, leur aspect physique, leur texture et la configuration de leur affleurement. Du plus fins aux plus grossiers, nous distinguons :

- Tuffisite « **Tuf** » - Roche compacte se présentant en filon à structure très fine homogène (< 1 mm) qui coupe les pépérites. Ces tuffisites ont une épaisseur très variable ; de quelques centimètres à 20 cm. A première vue, ellent ressemblent à une roche calcaire ;
- Retombées aériennes « **RA** » - Mélange de très minuscules (< 1 mm à quelques mm) grains de roche du socle, de basalte, de calcaire et une matrice de cendre oxydée. Elles passent souvent aux tufs indurés (cimentés et compacts) ;
- Pépérite stratifiée « **PpS** » - Roche composée de grains fins à grossiers de taille millimétrique, constituant des couches compactes stratifiées. Elles forment généralement les parties basse et moyenne des cratères. Entre les bancs compacts, figurent des couches ± cendreuses, tuffacées, gréseuses ou feuilletées témoignant du changement du régime des explosions. Leurs dépôts sont toujours granoclassés ;
- Pépérite massive « **PpM** » - Roche compacte composée de gros blocs divers de plusieurs centimètres voire ~20-30 cm (socle, calcaire, basalte) et d'une matrice compacte marno-calcaire. Très souvent, ces formes massives recouvrent les types stratifiés et ces deux faciès se trouvent souvent intimement mélangés ;
- Pépérite indifférenciée « **Pp** » - Pépérite dont la structure à l'affleurement ne permet pas un classement dans l'une ou l'autre catégorie ;
- Produit de maar « **PMa** » - Eléments pyroclastiques de taille millimétrique à pluri-centimètres mélangés à des cendres fines en banc compact et stratifié, voire grossier (décimétrique).

L'ensemble de ces produits phréatomagmatiques est classé en deux groupes :

- le **type-1** constitué d'éléments locaux mélangés aux composants d'origine profonde comme de la carbonatite et des minéraux juvéniles (quartz, feldspaths, micas, pyroxènes, oxydes de fer, dolomite, etc…) issus du magma. Il constitue la forme très compacte de la roche. Les éléments de la matrice ont une dimension < 0,1 mm ;
- le **type-2** composé d'éléments du substratum marno-calcaire broyé et pulvérisé sans apport de ciment magmatique venu des grandes profondeurs. On peut y trouver des fragments de basalte, présents en faible quantité. Ils sont l'expression d'éruptions superficielles violentes. Quand une matrice interstitielle est présente ces éléments sont > 0,1 mm.

Fz	Alluvions actuelles et récentes		Alluvions couvrant la coulée quaternaire **q-β**	**C1**	Colluvions de fonds de vallées et des ruisseaux
CP	Colluvions de pente	**Cβ-Cg**	Colluvions ou éboulis basaltiques, mélangées aux marno-calcaires remaniés		Blocailles solifluées, glissements en masse de terrains
Cβ	Colluvions ou éboulis basaltiques	**RCg**	Formation dérivée de l'Oligocène marno-calcaire remanié	**q-β**	Basalte s.l. génération Chaîne des Puys (-60.000 ans)
p2-β	Basalte *s.l.* de la Montagne de la Serre (-3,4 Ma)	**m3-β**	Basalte *s.l.* de Montrognon (-15,80 Ma)	**m2-βa**	Basanite à analcime, Burdigalien terminal (-15,97 Ma)
m2-k	Sables feldspathiques (alt. 725m)	**dk**	Dyke basaltique du Puy de Mardoux	**sb (**)**	Sill basaltique du Puy de Mardoux
BrBC	Brèche basaltique et calcaire	**Carb-Mag**	Enclave ou filon de carbonate magmatique dans pépérites massives	**m2-β(sb) (*)**	Sill basaltique de Gergovie, Burdigalien moyen-inférieur
m2-β(sb)1 (*)	Coulée basaltique de la corniche septentrionale de Gergovie	**m2-β(sb)2 (*)**	Lambeau médian sud du sill basaltique du N.-NE. de Gergovie	**m2-β(sb)3 (*)**	Lambeau médian nord du sill basaltique du N.-NE. de Gergovie
m2-β(sb)4 (*)	Lambeau nord du sill basaltique du N.-NE. de Gergovie	**m2-m**	Marne à Mélanies, Trapa pomeli (Burd. inf., -20,44 Ma)	**m1-cs**	Brèche de calcaire silicifié partiellement travertinisée
m1-C	Calcaire fossilifère des Gardettes (Aquit. Sup. - 21 Ma)	**m1-M**	Remplissage sédimentaire-1 : calcaire et marno-calcaire	**m1-K**	Remplissage sédimentaire-1 : « grès rose » des Gardettes
PMa	Produit de maar	**PpM**	Pépérite massive	**PpS**	Pépérite stratifiée
Pp	Pépérite indifférenciée	**RA**	Retombées aériennes interstratifiées dans les pépérites	**Calc**	« Calcaire » interstratifié dans les pépérites
g2-R	Calcaire gréseux récifaux à phryganes du Chattien	**g2-M**	Calcaires et calcaire marneux du Chattien	**g2-K**	Grès calcaires, sables (Chattien)
Str	Stromatolithe de Jussat (Chattien)	**γ**	Socle granitique hercynien		Contour du cratère de maar
	Contour masqué du cratère de maar	**CM1, CM2, CM3**	Cône de projections des maar-1, maar-2 et maar-3	**DP-RP**	Dépression de la « Rue de Prat » (Maar-1)
DP-Mx	Dépression de Mardoux (Maar-2)	Les gisements de fossiles : **TP, F3, F2** et **F1**	**TP** = Trapa pomeli (Legrand, inédit), Burdigalien inférieur -20,44 Ma ; **F3** = Gisement de mammifères de l'Aquitanien supérieur de Gergovie (-21 Ma) ; **F2** = Gisement de rhinocéros et micro-mammifères de l'Oligocène terminal de La Roche Blanche (-24 Ma) et **F1** = Gisement de mammifères, reptiles, oiseaux, gastéropodes de l'Oligocène supérieur de la carrière des « Fours à Chaux » de Gergovie (-27,82 Ma)		
X	Emplac. du calcaire muni d'empreintes de plantes	**1**, **2**, **3**	Repères de l'emplacement des centres du cratère des maar-1 de Gergovie-nord, maar-2 du Puy de Mardoux et maar-3 de Gergovie-ouest		
Les failles : **Fa**, **Fb**, **Fc**, **Fd**, **Fe**, **Ff**, **Fg**, **Fh, Fi** et **Fj**	**Fa** = Faille du Puy de Mardoux (N304°-56° NE) à Af3-7 ; **Fb** = Faille (N310°-70°SO) au nord du piton bas des Rocs Rouges dans Af1-15 ; **Fc** = Faille du Bois des Fours à Chaux (N340°) ; **Fd** = Faille du Ravin de Macon (N303°) ; **Fe** = Faille de Beauséjour (N10°), **Ff** = Faille de Jussat-est (N326°) ; **Fg** = Faille de Jussat-ouest (N341°) ; **Fh** = Faille d'Opme (N338°) ; **Fi** = Faille au nord-est de Chanonat (N321°) et **Fj** = Faille à l'est du Puy de Cimard (N337°).				

(*) = Le sill basaltique « m2-β(sb) » est une « *intrusion de basalte labradorique à olivine* » (Michel, 1953). (******) = Le sill basaltique à l'est du Puy de Mardoux (**Af3-16**) est du basalte porphyrique à gros phénocristaux de taille millimétrique de pyroxène et d'olivine.

Tabl. 2 : Légende des cartes géologiques, des coupes géologiques de synthèse, des photos et des photos aériennes.

Tabl. 2: Caption of the geological maps, synthetic sections, photos and aerial photos.

Les autres symboles utilisés sont explicités dans la légende du tableau 2.

3. Données et interprétations nouvelles

3.1 Cartes géologiques et coupes synthétiques

L'ensemble des résultats nouveaux présentés (cartes, coupes, interprétations photogéologiques) suit une charte de teintes unique dont le détail est donné dans le tabl. 2.

Trois cartes géologiques de détail ont été réalisées (fig. 18 à 20) et synthétisées dans une carte d'ensemble (fig. 21). En préalable, le traitement d'un levé « Lidar » a permis d'avoir une image topographique extrêmement précise de la zone d'étude (fig. 17), fournissant une aide précieuse lors des levés de terrain.

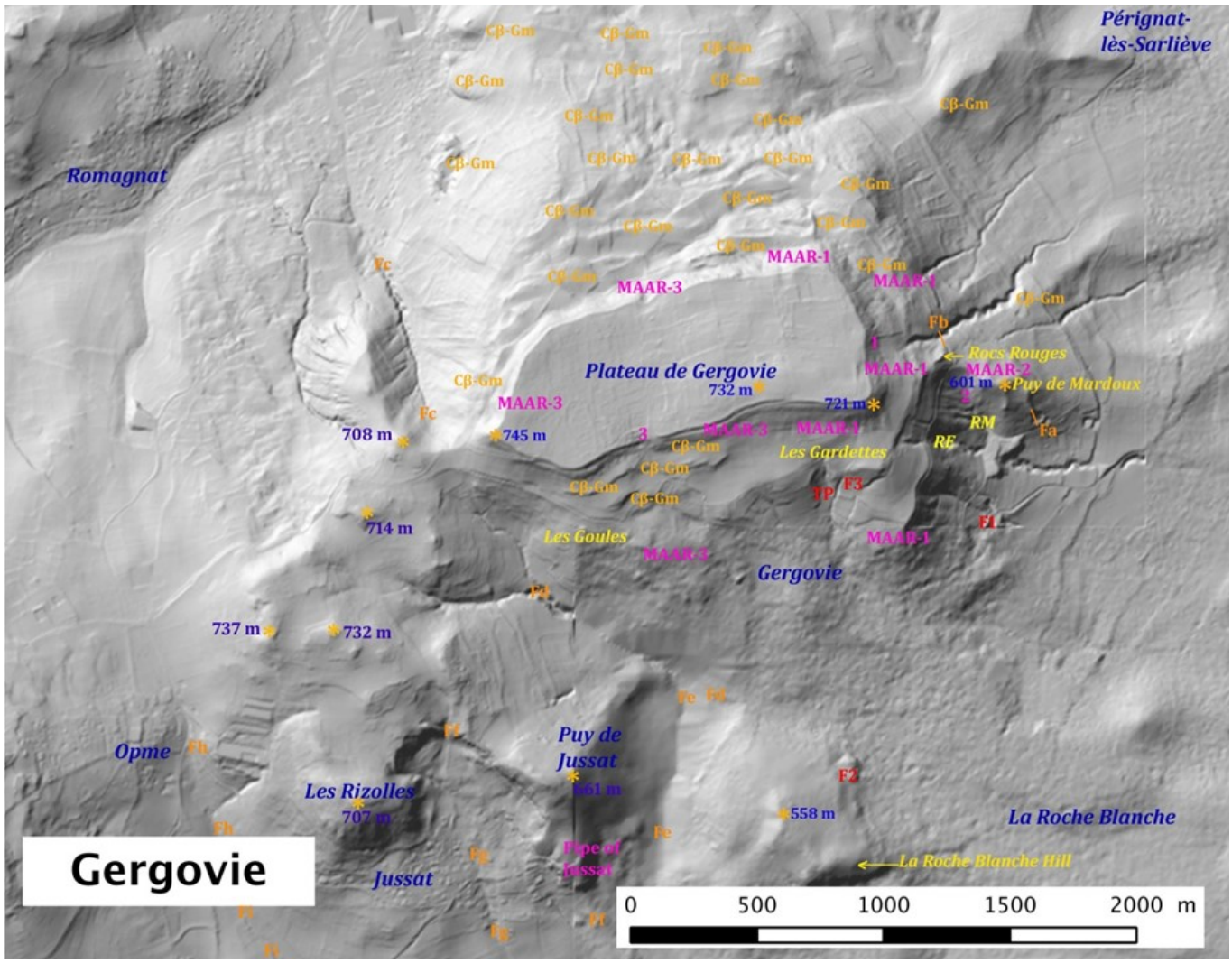


Fig. 17 : Levé LiDAR (Light Detection and Ranging = Télédétection par Laser) sur le plateau de Gergovie Référence : Boivin, compilation des sources du Centre Régional Rhône -Alpes-Auvergne pour l'Information Géographique (CRAIG) – MNT IGN 63 et CRAIG - APEI-SINTEGRA 2013) avec en surcharge les principaux lieux évoqués dans le texte, la position des gisements de fossiles (TP, F1, F2 et F3) de Gergovie et les panneaux glissés en masse (Cβ-Gm NO., Cβ-Gm nord, Cβ-Gm NE., Cβ-Gm est et Cβ-Gm sud). Les segments Fc, Fd, Fe, Ff, Fg, Fh et Fi sont des failles dans l'Oligocène, épousant le fond des ruisseaux. Fb = Faille au nord des Rocs Rouges (N310°- 70° SO.) et Fa = Faille du Puy de Mardoux (N304°-56° NE.) qui n'ont pas été suivies de marque sur la topographie. Sur cette image nous constatons que la faille « Fg » (Jussat-ouest), est une faille courte et profonde vers le Nord ; elle rejoint l'extrémité nord de la faille « Ff » de Jussat-est. *RM* = « Ravin de Mardoux » ; *RE* = « Ravin est » ; 1, 2, 3 = Centre des cratères des maar-1 de Gergovie nord, maar-2 du Puy de Mardoux et maar-3 de Gergovie-ouest.

Fig. 17: LiDAR survey (Light Detection and Ranging) of the de Gergovie Plateau *(Reference: Boivin, compilation of the sources of the Rhône-Alpes-Auvergne Regional Center for Geographic Information (CRAIG) - MNT IGN 63 and CRAIG - APEI-SINTEGRA 2013) with indication of the main localities referred to in text, position of the fossil deposits (TP, F1, F2 and F3) and mass slided panels (Cβ-Gm NW., North Cβ-Gm, Cβ -Gm NE., Cβ-Gm east and Cβ-Gm south). The segments Fc, Fd, Fe, Ff, Fg, Fh and Fi are faults affecting the Oligocene, following the path of the streams. Fb = Fault north of the Rocs Rouges (N310° -70° SW.) and Fa = Faille of Puy de Mardoux (N304° -56° NE.) which are not revealed by topography. On this image the fault "Fg" (Jussat-west) appears as a short segments deeping to the north and connected with the northern end of the "Ff" fault of Jussat-East. RM = "Ravine of Mardoux"; RE = "Ravine east"; 1, 2, 3 = Crater Center of the maar-1 of Gergovie nord, maar-2 of Puy de Mardoux and maar-3 of Gergovie-ouest. See.*

La première carte géologique montre les maars orientaux précoces (maar-1 et maar-2), et l'intersection, au NO des Gardettes, entre le maar-3 (Gergovie-ouest) et la bordure occidentale du maar-1 (Gergovie-nord).

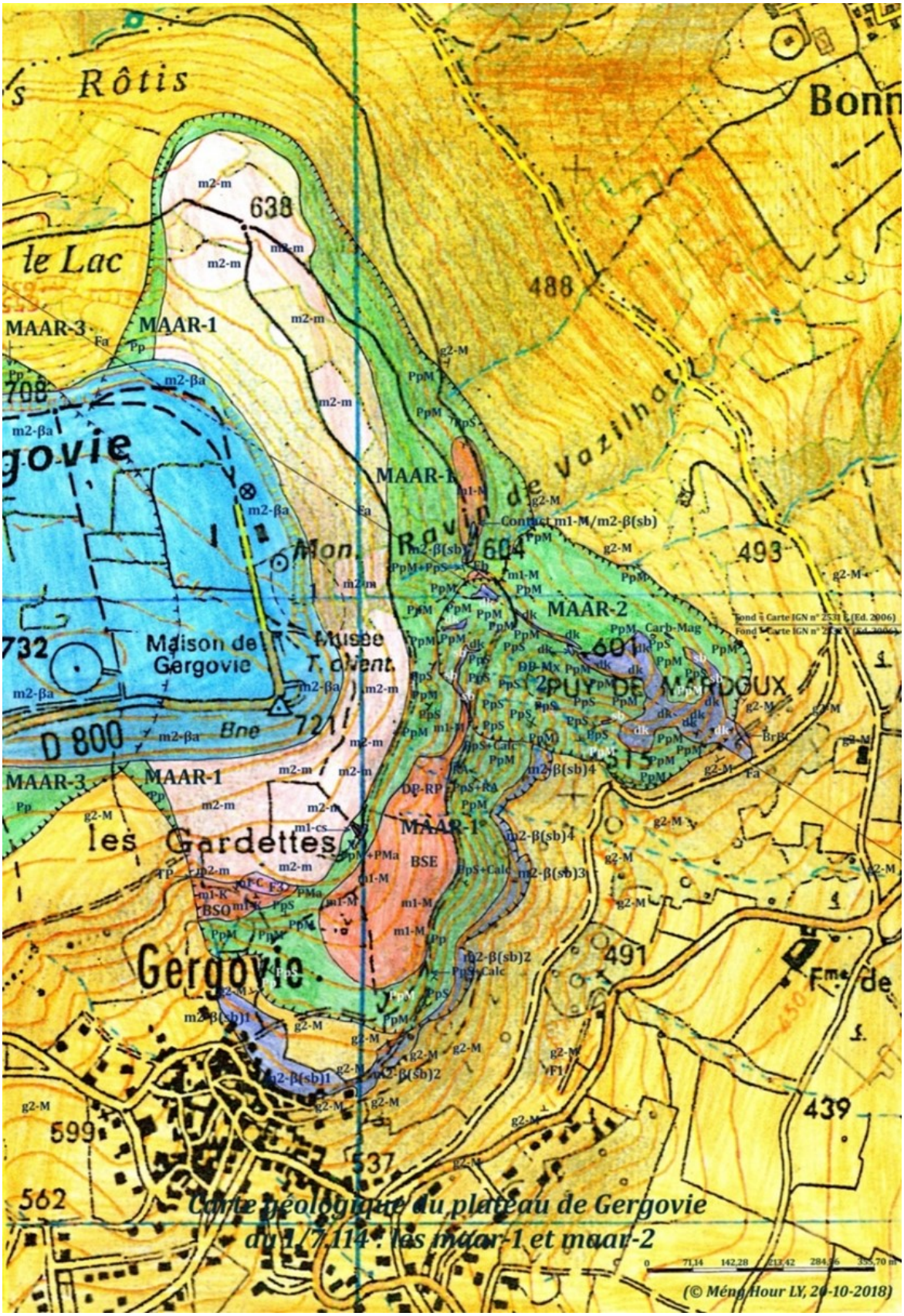


Fig. 18 : Carte géologique de la partie orientale de la zone étudiée (les formations superficielles ne sont pas représentées). BSE = Bassin sédimentaire intracratérique orient al ; BSO = Bassin sédimentaire intracratérique occidental.

Fig. 18: Geological map of maar-1 and maar-2 *(the surficial formations are not represented). Gergovie-west maar-3 cut the western edge of the Gergovie-north maar-1 north-west of the Gardettes locality. BSE = eastern intracrateric sedimentary basin; BSO = Western intracrateric sedimentary basin.*

La deuxième carte (fig. 19) détaille la structure du plateau de Gergovie (partie centrale de la zone d'étude) avec localisation de chaque diatrème, des failles (Fa, Fb, Fc et Fd) et gisements fossilifères (TP, F3 et F1).

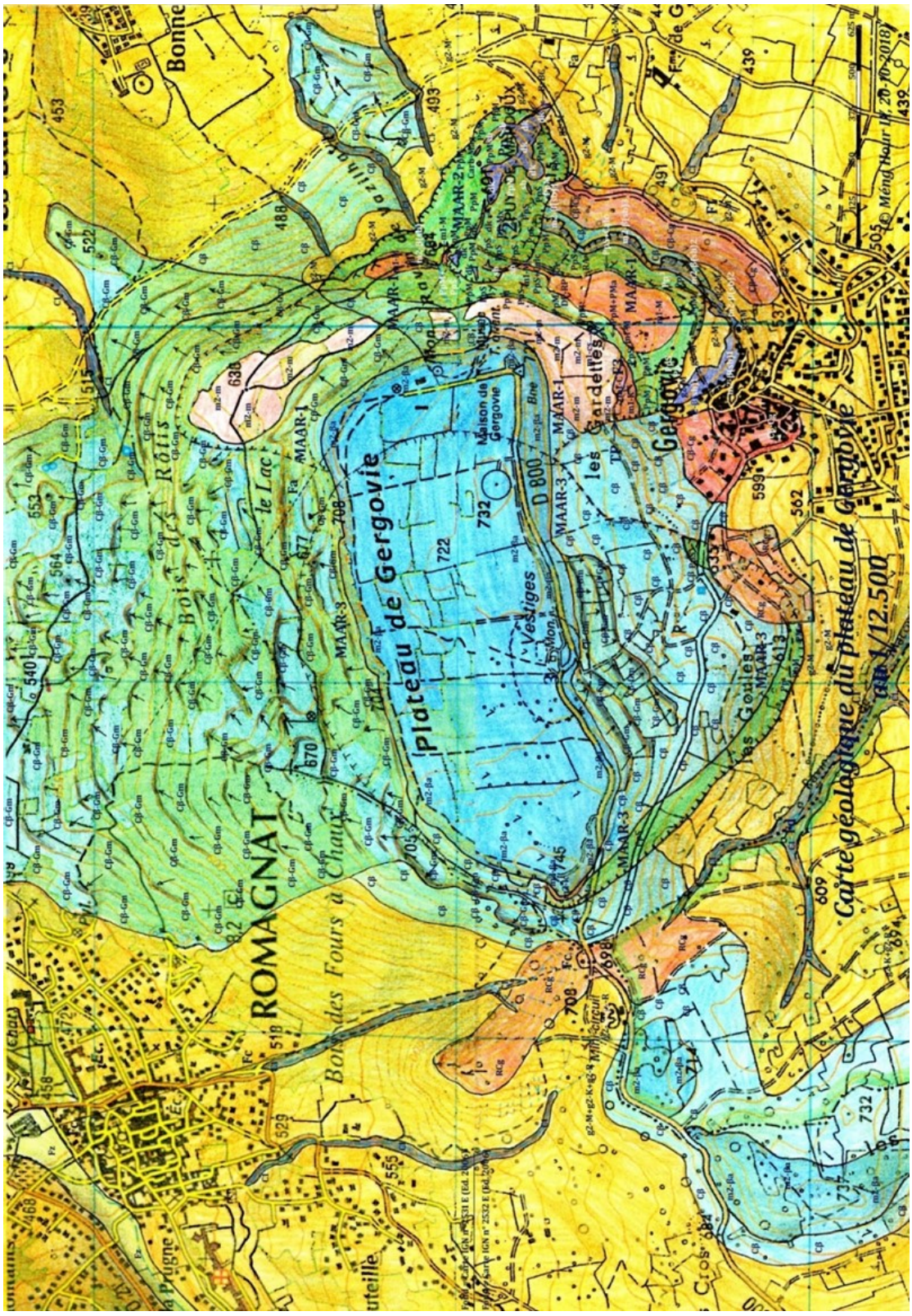


Fig. 19 : Carte géologique du plateau de Gergovie (limite des feuilles Veyre-Monton 717 et Clermont-Ferrand 693). Les repères 1, 2 et 3 marquent l'emplacements des diatrèmes. Fa, Fb, Fc et Fd sont des failles, et TP, F3 et F1 des gisements fossilifères.

Fig. 19: Geological map of the Gergovie Plateau *(border zone between the Veyre-Monton [717] and Clermont-Ferrand [693] geological maps). The marks 1, 2 and 3 indicate the location of each diatreme. Fa, Fb, Fc and Fd are faults. TP, F3 and F1 are fossiliferous deposits.*

La troisième carte (fig. 20) porte sur les secteurs de Jussat et du Puy Giroux, à l'Ouest de la zone d'étude. Les contours du socle granitique γ, de la coulée quaternaire q-β, de la basanite m2-βa du Puy de Cimard et des alluvions « Fz » y sont extraits de la Carte de la Chaîne des Puys (6ème édition, Boivin *et al*., 2017) et nous y avons ajouté les dessins du Puy Giroux, de Jussat et du SO du plateau de Gergovie.

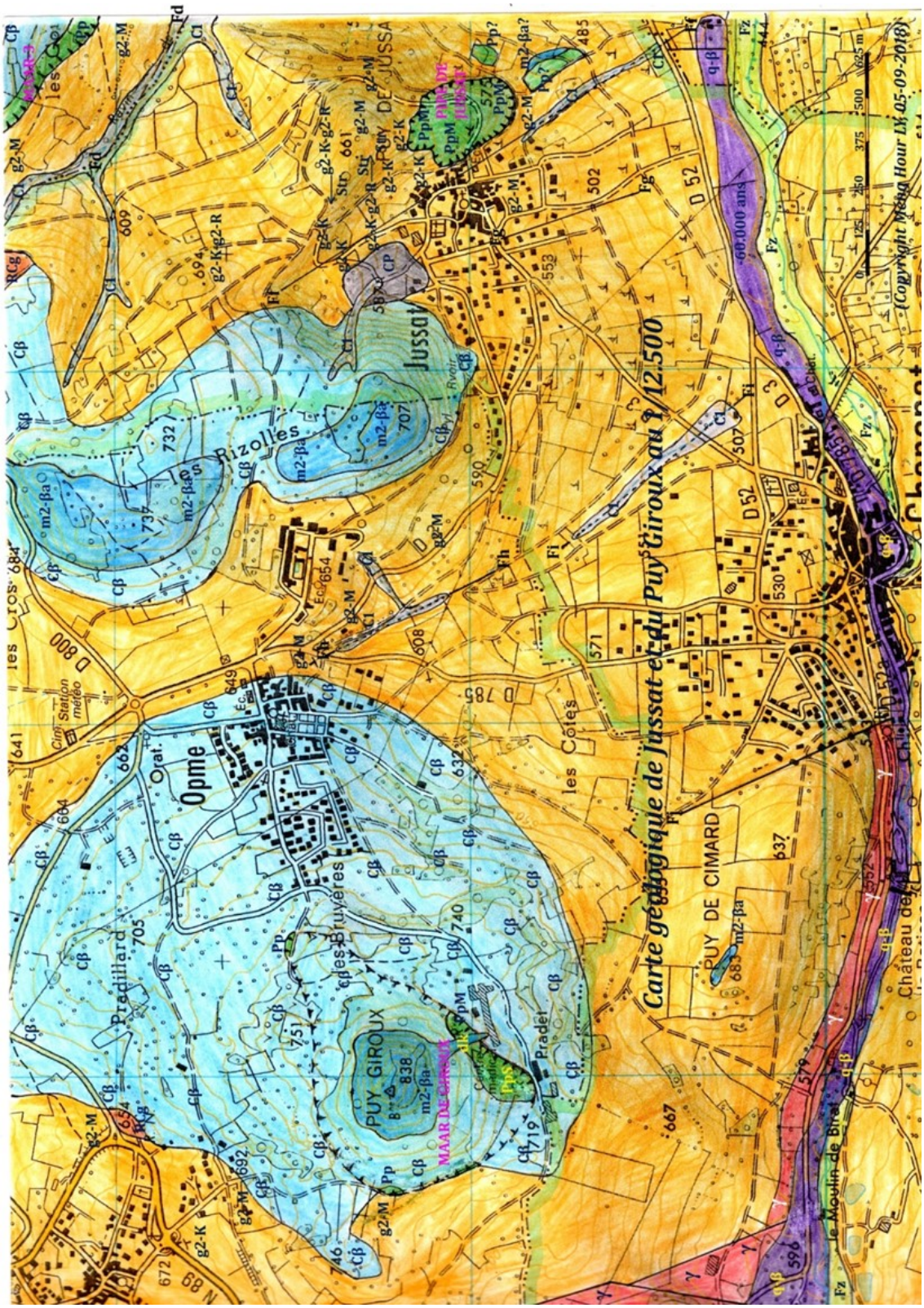


Fig. 20 : Carte géologique de Jussat et du Puy Giroux . Les contours du socle granitique γ, de la coulée quaternaire q-β, de la basanite m2-βa du Puy de Cimard et des alluvions « Fz » sont repris de la Carte de la Chaîne des Puys (6ème édition, Boivin *et al*., 2017) avec l'accord du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Les contours du Puy Giroux, de Jussat et du sud-ouest du plateau de Gergovie sont issus de nos levés.

Fig. 20: Geological map of Jussat and Puy Giroux. *The contours of the γ granitic basement, q-β Quaternary flow, Puy-Cimard m2-βa basanite and the Fz alluvial deposits are extracted from the 6th edition of the map of Chaîne des Puys (Boivin* et al., *2017) with the agreement of the Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. We have added our contours of Puy Giroux, Jussat and the south-west of the Gergovie Plateau.*

La carte de synthèse (fig. 21) combine les trois précédentes avec un dessin adapté à une représentation à l'échelle 1/25 000.

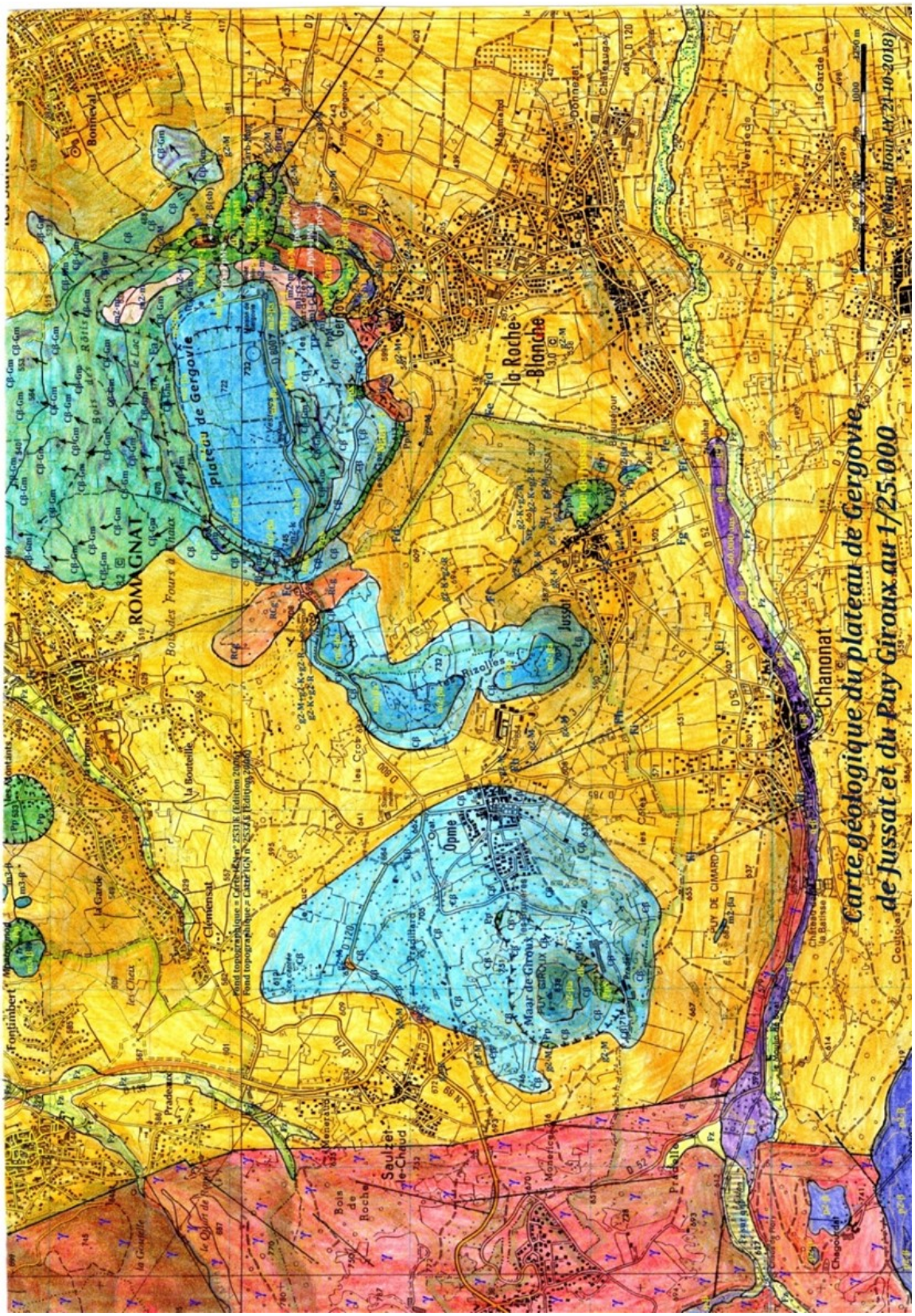


Fig. 21 : Carte géologique du plateau de Gergovie, de Jussat et du Puy Giroux sur fond topographique au 1/25 000, basée en partie sur les nouveaux levés (Puy Giroux, de Jussat et du plateau de Gergovie) et comprenant une reproduction partielle de la Carte de la Chaîne des Puys (6ème édition ; Boivin *et al.*, 2017) incluse avec l'accord du Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Fa, Fc, Fd, Fe, Ff, Fg, Fh, Fi et Fj sont des failles. Les colluvions de pentes et de fond des vallées ne sont pas représentés afin de faciliter la lecture. Les pépérites et le basalte du Montrognon datent de -15,80 MA.

Fig. 21: Geological map of the plateau de Gergovie, Jussat and Puy Giroux on a topographic background at 1/25,000 scale. *Partial reproduction of the 6th edition of the map of Chaîne des Puys (Boivin et al., 2017) has been included with the agreement of the Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne.. We have added our outlines of Puy Giroux, Jussat and the plateau de Gergovie. Fa, Fc, Fd, Fe, Ff, Fg, Fh, Fi and Fj are faults. The slope and valley colluvial deposits are ignored for easy reading. The peperite and basalt of Montrognon date to -15.80 Ma .*

Les 6 coupes de synthèse (fig. 22 à 27) reproduisent l'interprétation en profondeur du système volcanique le long de 6 transects recoupant le plateau. Ces coupes sont localisées sur la fig. 28 où sont également reportés l'ensemble des itinéraires géologiques effectués.

Une première coupe, qui recoupe l'ensemble du plateau selon une direction quasi-équatoriale (OSO – ENE) met en évidence la succession des 3 maars (fig. 22).

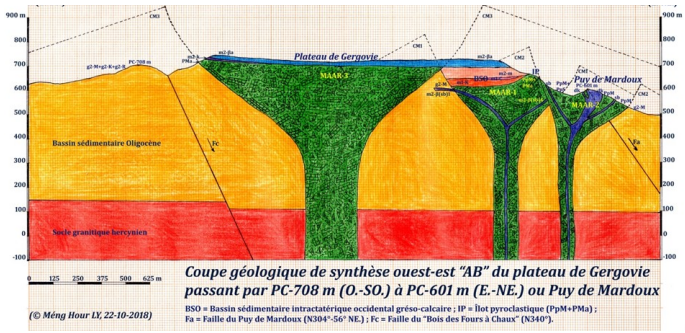


Fig. 22 : Coupe géologique de synthèse ouest-est « AB » du plateau de Gergovie, passant par PC-708 m (OSO) et PC-601 m (ENE). Cette coupe passe par le sill basaltique (sb) (Af1-22) au Sud des Rocs Rouges et par le sill basaltique (Af3-16) à l'Est du Puy de Mardoux.

***Fig. 22: West-East geological section "AB" of the Gergovie Plateau**, passing through PC-708 m (WSW) and PC-601 m (ENE) (Puy de Mardoux). This section crosses a basaltic sill (sb) (Af1-22) south of the Rocs Rouges and another basaltic sill (Af3-16) east of Puy de Mardoux.*

Une deuxième coupe (fig. 23), orientée N-S et passant à peu près au centre du plateau puis par le point-côté 638 du NNE, met en évidence le maar-1 que surmontent les dépôts sédimentaires de comblement puis la coulée basanitique récente coiffant le plateau.

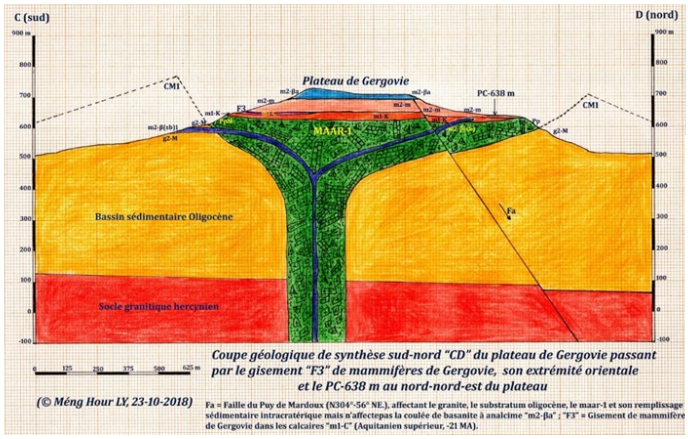


Fig. 23 : Coupe géologique de synthèse « CD » sud-nord du plateau de Gergovie. La coulée basaltique « m2-β(sb)1 » est encadrée par deux couches de marno-calcaires du Chattien. La faille « Fa » du Puy de Mardoux décale les marnes à Mélanies d'une dizaine de mètres, jeu constaté entre les versants sud et nord du plateau ; elle n'affecte pas la basanite « m2-βa » à analcime terminale.

Fig. 23: South-North geological section "CD" of the Gergovie Plateau. The basaltic flow "m2-β(sb)1" is bounded by two layers of Chattian marl-limestone. The fault "Fa" of Puy de Mardoux shifts the marl to Melanies of more than ten meters as observed between the south and north sides of the plateau; it does not affect the sommital basanite flow "m2-βa" at terminal lava flow.

La troisième coupe traverse la partie orientale du plateau selon une direction sub-méridienne (fig. 24). Elle précise les relations entre les maars précoces (maar-1 et maar-2).

La quatrième coupe (fig. 25), légèrement réorientée au niveau du point H (fig. 25), traverse la partie orientale du plateau selon une direction sub-méridienne. Elle met en évidence l'emboitement des maars 1 et 2.

La cinquième coupe (fig. 26), qui complète les

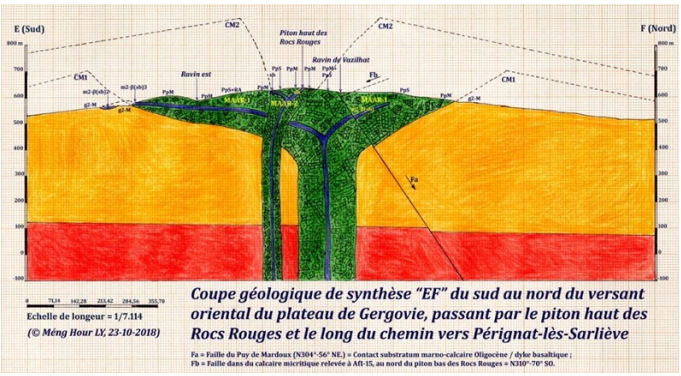


Fig. 24 : Coupe de synthèse géologique « EF » du Sud au Nord du versant est du plateau de Gergovie, passant par le haut piton des Rocs Rouges et le long du chemin qui mène à Pérignat-lès-Sarlièvе. Le filon basaltique "sb" bordant le maar-2 du Puy de Mardoux est représenté plus bas (cf. *infra*). Combiner cette coupe avec la coupe « GHI » (fig. 25) permet d'appréhender la structure strombolienne entourant les Rocs Rouges.

***Fig. 24: South-North section ("EF") of the eastern slope of the Gergovie Plateau** passing through the high peak of the Red Rocks and along the path that leads to Pérignat-lès-Sarlièvе. The basalticv lode "sb" bordering the maar-2 of Puy de Mardoux is pictured below. Combining this section with section "GHI" (fig. 25) reveals the Strombolian structure around the Rocs Rouges.*

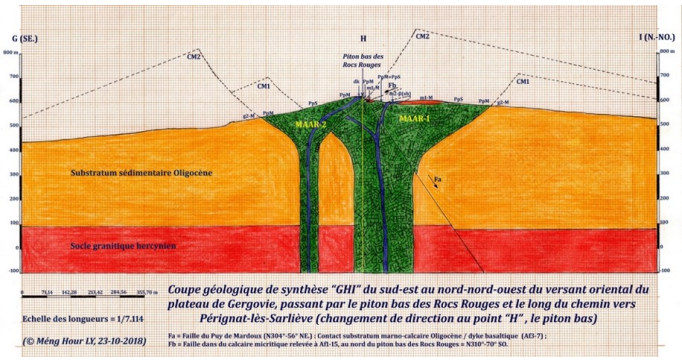


Fig. 25 : Coupe géologique de synthèse du SE à NNO « GHI » du versant oriental du plateau de Gergovie, passant par le piton bas des Rocs Rouges puis le long du chemin vers Pérignat-lès-Sarlièvе.

***Fig. 25: South-East to North-Northwest ("GHI") geological section on the eastern side of the Gergovie Plateau** passing through the low piton of the Rocs Rouges and along the path to Pérignat-lès-Sarlièvе.*

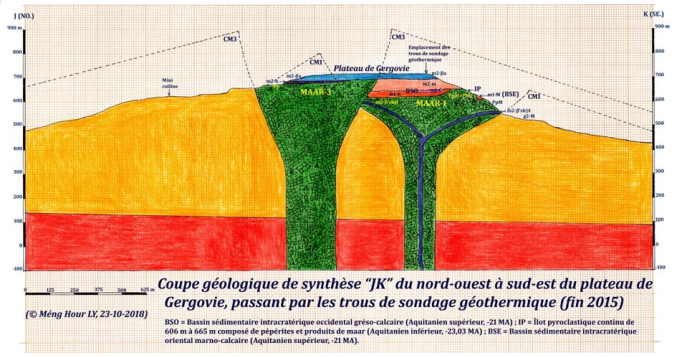


Fig. 26 : Coupe géologique de synthèse « JK » du NO au SE du plateau de Gergovie, passant par les trous de sondage géothermique (fin 2015). Sur cette coupe, nous constatons l'absence d'intrusions basaltiques dans le maar-3 de Gergovie-ouest.

***Fig. 26: North-West to South-East ("JK") geological section of the Gergovie Plateau** passing through different geothermal boreholes (program endet in 2015). On this section, we note the absence of basaltic intrusions in maar-3 of Gergovie-west.*

informations données par la première coupe (fig. 22), traverse la partie est du plateau selon une direction SE-NO (fig. 27). Elle permet de visualiser les relations entre les maars 1 et 3, et montre l'absence d'intrusions basaltiques dans le maar-3 de Gergovie-ouest.

Enfin, la sixième coupe (fig. 27), de direction proche de la précédente mais décalée vers l'Ouest (fig. 26), confirme l'absence d'intrusions basaltiques dans le maar-3 de Gergovie-ouest.

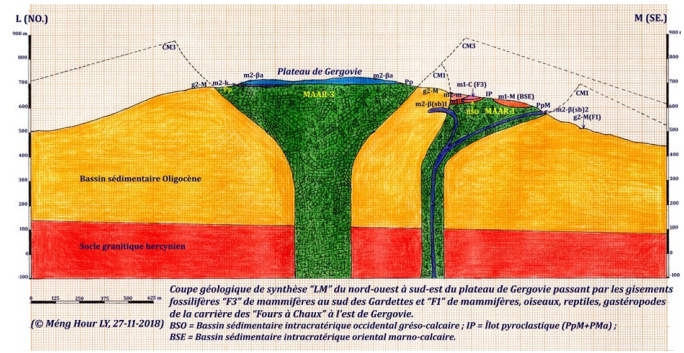


Fig. 27 : Coupe géologique de synthèse « LM » NO à SE, passant par les deux gisements de mammifères « F1 » et « F3 ». Sur cette coupe, nous constatons l'absence d'intrusions basaltiques dans le maar-3 de Gergovie-ouest. La photo aérienne (fig. 39) permet de visualiser les terrains du maar-1 de Gergovie-nord représentés sur la présente coupe. Par ailleurs, cette coupe passe par le lambeau « **m2-β(sb)2** » situé en contrebas de la « Rue de Prat » à 60 m au Nord de la coupe dressée par J. Giraud (1902) (fig. 3).

Fig. 27: North-West to Southeast ("LM") geological section, passing through the two mammalian deposits "F1" and "F3". *On this section, we note the absence of basaltic intrusions in maar-3 of Gergovie-west. Maar-1 of Gergovie-North is also visible on the aerial Photo 07 (fig. 39). This section passes through the sill " m2-β(sb)2" below "Rue de Prat" and 60 m north of section n° 69 (page 238) reported by J. Giraud (1902).*

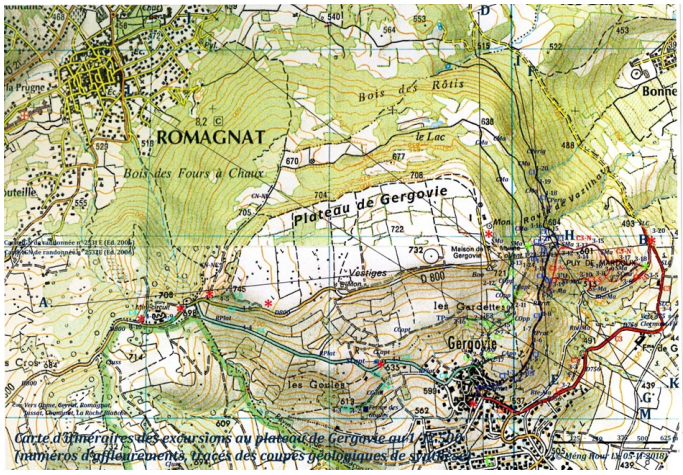


Fig. 28 : Carte des itinéraires des excursions géologiques et affleurements du plateau de Gergovie, avec tracés des coupes géologiques de synthèse (fig. 21 à 25) (fond IGN, 1/25 000).

D800 = Route vers Opme/Romagnat/Ceyrat ; ***D756*** = Route vers A75 et Clermont-Ferrand ; ***RPrat*** = « Rue de Prat » ; ***SMa*** = Sentier de Mardoux, reliant la Maison de Gergovie au Puy de Mardoux ; ***SCarr*** = Sentier d'accès à la carrière d'En-Haut (**Af3-7**) ; ***CMa*** = Chemin de Mardoux faisant une boucle au nord-nord-est du plateau dans le « Bois des Rôtis » par le PC-638 m vers le Puy de Mardoux ; ***CPerig*** = Chemin du PC-604 m (« Ravin de Vazilhat ») vers Pérignat-lès-Sarlièvre ; ***Ss-Ma*** = Sentier sud du Puy de Mardoux ; ***CGoul*** = Chemin des Goules ; ***CCapt*** = Chemin prolongeant le chemin de Mardoux vers « ***SCapt*** », la station de captage d'eau potable à l'ouest de Gergovie ; ***CApo*** = Chemin Gergovie vers l'apophyse basaltique (**Af1-4**) ; ***COpp*** = Chemin Gergovie-Oppidum ; ***Rte-Ma*** = « Route de Mardoux » ; ***RPlat*** = « Route du Plateau » ; ***SLC*** = Chemin « Sur les Côtes Mardoux » ; ***CN-NE.*** = Chemin au pied et à l'ouest du plateau de Gergovie vers le nord-nord-est ; ***CJuss*** = Chemin partant de la D800 vers le nord du Puy de Jussat ; **Etoile rouge** (*) = Points de stationnement des voitures ; **Etoile verte** (*) = Portillons en bois sur le sentier de Mardoux. **Numéros d'affleurements** (**AfX-Y**). Repérage des **tracés des coupes géologiques de synthèse suivantes : AB** = de ouest-sud-ouest à est-nord-est par PC-708 m et PC-601 m, **CD** = du sud au nord par PC-638 m, **EF** = du sud au nord par le piton haut des Rocs Rouges, **GHI** = du sud-est à nord-nord-ouest par le piton bas des Rocs Rouges, **JK** = du nord-ouest à sud-est par les trous de sondage géothermique et **LM** = du nord-ouest à sud-est par les gisements fossilifères « **F1** et **F3** »). « **F1** » = Gisement de mammifères, oiseaux, reptiles, gastéropodes dans les marno-calcaires de la carrière des « Fours à Chaux » à l'est de Gergovie ; « **F3** » = Gisement de mammifères de Gergovie, dans des calcaires au sud des Gardettes ; « **TP** » = Gisement de Trapa pomeli dans les marnes au sud des Gardettes, altitude 640 m (Legrand, inédit).

Fig. 28: Map showing the geological excursions and outcrops of Gergovie Plateau *with indication of the lines of the synthetic geological sections exposed above (topographic map at 1:25,000 scale from French National Geographic Institute [IGN]).*

D800 *= Road to Opme/Romagnat/Ceyrat;* ***D756*** *= Road to A75 and Clermont-Ferrand;* ***RPrat*** *= "Rue de Prat";* ***SMa*** *= Mardoux Trail, connecting the Maison de Gergovie to Puy de Mardoux;* ***SCarr*** *= Path to the Quarry of En-Haut (Af3-7);* ***CMa*** *= Path of Mardoux making a curve north-north-east of the plateau in the "Bois des Rôtis" connecting the PC-638 m to Puy de Mardoux;* ***CPerig*** *= Path from PC-604 m ("Ravine de Vazilhat") to Pérignat-lès-Sarlièvre;* ***Ss-Ma*** *= Path of South of Puy de Mardoux;* ***CGoul*** *= Path of the Goules;* ***CCapt*** *= Trail extending the path from Mardoux to "**SCapt**", the water capture station west of Gergovie;* ***CApo*** *= Gergovie path to the edge the basaltic unit (Af1-4);* ***COpp*** *= Gergovie-Oppidum path;* ***Rte-Ma*** *= "Route de Mardoux";* ***RPlat*** *= "Route du Plateau";* ***SLC*** *= Path "Sur the Côtes Mardoux";* ***CN-NE.*** *= Path in the foot and west of the plateau de Gergovie to the north-northeast;* ***CJuss*** *= Path from the D800 to the north of Puy de Jussat;* ***Red Star (*)*** *= Parking points for cars;* ***Green star (*)*** *= Wooden gates on the trail of Mardoux. Outcrop numbers (**AfX-Y**). Tracking of plots of the following synthetic geological sections:* ***AB*** *= from west-southwest to east-north-east by PC-708 m and PC-601 m,* ***CD*** *= from south to north by PC-638 m,* ***EF*** *= from south to north by the high peak of the Rocs Rouges,* ***GHI*** *= from south-east to north-northwest by the low peak of the Rocs Rouges,* ***JK*** *= from north-west to south-east by geothermal boreholes and* ***LM*** *= from northwest to southeast by the fossiliferous "**F1** and **F3**" deposits. "**F1**" = Deposit of mammals, birds, reptiles, gastropods in the marl-limestone quarries of "Fours à Chaux" east of Gergovie; "**F3**" = Mammal deposit of Gergovie, hosted by limestone south of Les Gardettes; "**TP**" = Trapa pomeli deposit in the marls south of Les Gardettes, altitude 640 m (Legrand, unpubl.).*

Les observations de terrains synthétisées dans les cartes et coupes précédentes montrent que chaque maar-diatrème possède ses propres caractéristiques soit :

- **Maar-1 de Gergovie-nord** (Aquitanien inférieur, -23,03 Ma)
  - grande taille (0,78*1,5 km) et allongement sud-nord donant une forme en ballon de rugby ;
  - activité pyroclastique complexe, avec remontée magmatique carbonatitique sur 500 m de long (pas d'intrusions basaltiques internes synchrones des activités phréatomagmatiques) ;
  - remplissage sédimentaire intracratérique à –21 Ma important (50 m d'épaisseur, 912 m de long et 190 m de large). ;
  - le sill basaltique sud-nord de 1,1 km de long témoigne d'une activité postérieure aux remplissages sédimentaires intracratériques, donc indépendante du phréatomagmatisme du maar-1 (-20 Ma au Burdigalien moyen-inférieur).
- **Maar-2 du Puy de Mardoux** (Burdigalien moyen-supérieur, -19 à -18 Ma)
  - petite taille (0,32x0,5 km), activité pyroclastique complexe ;
  - intrusions magmatiques basaltique et carbonatitique ;
  - activité strombolienne, avec construction d'un gros dyke basaltique de 0,51 km de long ;
  - pas de remplissage sédimentaire intracratérique.
- **Maar-3 de Gergovie-ouest** (Burdigalien supérieur, -17 à -16,5 Ma)
  - taille énorme (1,4 km de diamètre) ;
  - produits pyroclastiques très épais (125 m), apparemment sans trace de remontée carbonatitique ;
  - pas d'intrusions basaltiques (sills ou dykes) qui accompagneraient le phréatomagmatisme ;
  - faible remplissage sédimentaire intracratérique (5 m d'épaisseur).

3.2 Chronologie des évènements phréato-magmatiques du plateau de Gergovie

Sur le socle hercynien granitique, une sédimentation lacustre s'installe à l'Oligocène supérieur (Chattien) qui correspond aux dépôts marno-calcaires « g2 » localisés à l'Est et au Sud. À l'Ouest, la sédimentation est plus marneuse avec intercalations de calcaires gréseux récifaux à phryganes « g2-K+ g2-R + g2-M » (-27,82 Ma). Ce sont des couches à Helix ramondi, des marnes à Cypris, des marno-calcaires à planorbes, mammifères, reptiles, oiseaux etc. (Peterlongo et de Goër, 1978).

À la suite, nous résumons les conclusions de nos études de terrains détaillées dont on trouvera l'expopsé exhaustif dans Ly (2019) et Ly (2021, en préparation). Nous

divisons l'histoire du phréatomagmatisme et des phénomènes volcano-sédimentaires du plateau de Gergovie en neuf phases décrites à la suite :

Phase-1 : Explosion du maar-1 de Gergovie-nord-Aquitanien inférieur (-23 Ma)

Les phénomènes phréatomagmatiques de Gergovie débutent par les explosions du maar-1 de Gergovie-nord dont le cratère, orienté NS, a une forme elliptique de 775x1 538 m. Au NNE de Gergovie, se mettent en place des pépérites massives, des pépérites stratifiées, des retombées de cendres fines très épaisses alternant avec des bancs massifs de pépérites stratifiées. Les pépérites stratifiées à intercalations de « calcaire » et de retombées aériennes constituent le gros affleurement éventré par le « Ravin est », entre le chemin « Rue de Prat » et la lisière du bois. Du côté occidental du maar-1, le long du chemin Gergovie-Oppidum, sont déposées, au Nord de Gergovie, des projections fines à la base, puis très grossières, déposées en masse vers l'intérieur du cratère, de 606 à 665 m d'altitude aux Gardettes.

Des pépérites stratifiées et massives se trouvent sur la feuille de Clermont-Ferrand le long du chemin du PC-604 m (« Ravin de Vazilhat », Pérignat-lès-Sarlièvre), ente 580 et 600 m d'altitude. Une intercalation de pépérites stratifiées à composants clastiques de ~3-4 m d'épaisseur se trouve dans les pépérites massives, à 650 m d'altitude, 90 m au Sud des Rocs Rouges. Les roches affleurent forme une falaise bien visible dans la topographie (Mini-Falaise Blanche).

Les pépérites massives et les produits de maar constituent le rebord occidental du plateau vers 650-665 m d'altitude, le long du chemin du captage ; elles constituent l'éperon rocheux qui domine le NO. de Gergovie, séparant le remplissage sédimentaire intracratérique des produits de la phase 2 suivante. Un chenal occidental gréso-calcaire dans le très long bassin oriental marno-calcaire se distingue clairement dans le paysage (fig. 29).

Phase-2 : premier remplissage sédimentaire intracratérique « m1 » à l'Aquitanien supérieur (-21 Ma)

Le premier remplissage sédimentaire intracratérique « m1 » à l'Ouest (BSO) débute au Sud des Gardettes, entre 630 à 655 m d'altitude. Il se débute par un grès rose (« m1-K ») à stratification entrecroisée et parsemé de petits éléments basaltiques, en fragments anguleux mélangés aux composants détritiques et calcaires. Ces éléments basaltiques proviennent probablement des éruptions de volcans proches, le Puy Saint-Romain ou le Puy Gourdon ou de Cournon-est. Les grès roses ont subi une inversion de

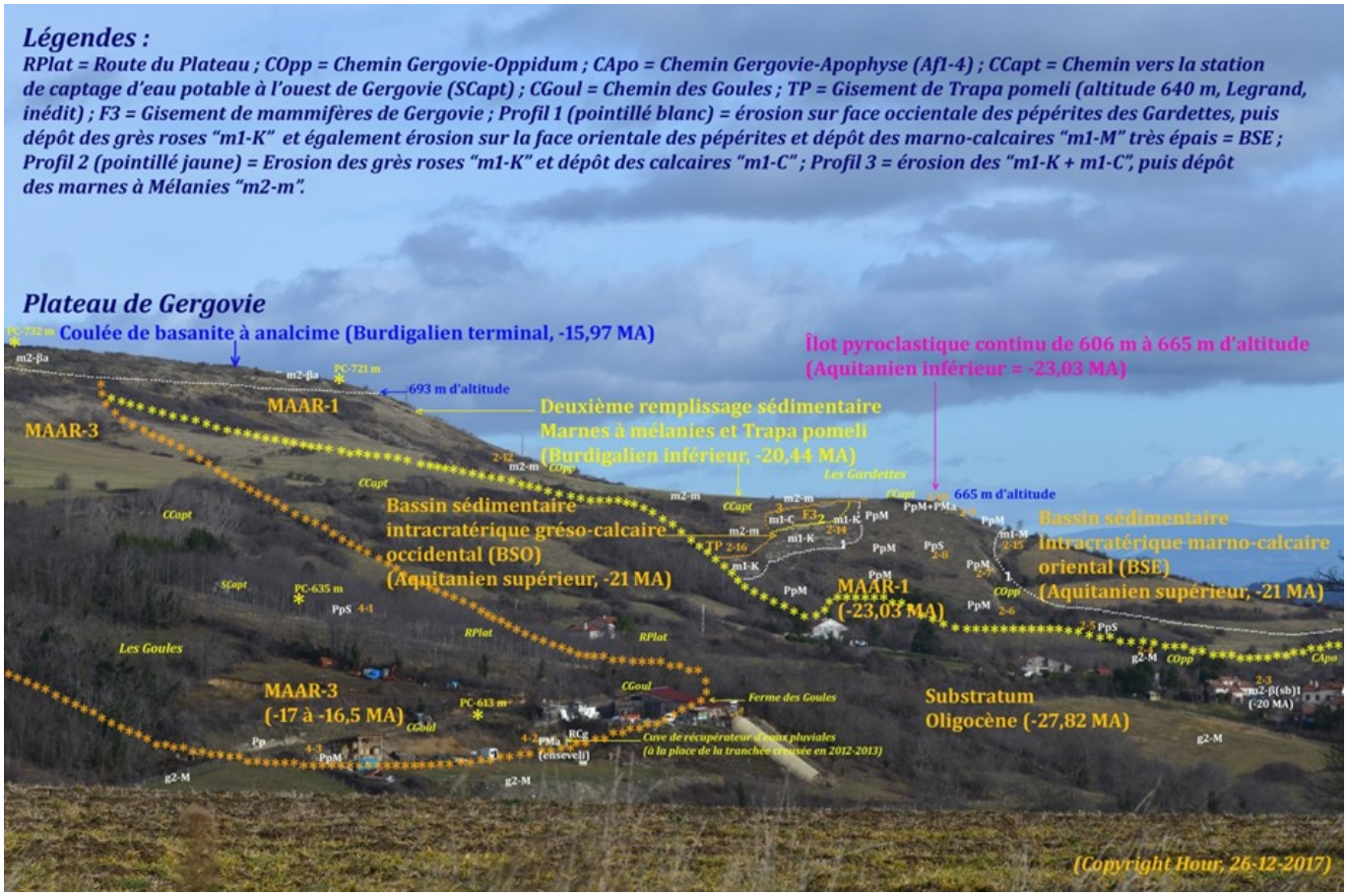


Fig. 29 (photo 03) : Vue générale prise depuis le sommet du Puy de Jussat sur le sud du maar-1 de Gergovie-nord et le sud du maar-3 de Gergovie-ouest. Nous observons au premier plan, les pépérites du maar-3 de Gergovie-ouest vers le chemin des Goules (Af4-2 et Af4-3). Cette image, prise depuis le sommet du Puy de Jussat, montre le maar-1 de Gergovie-nord coupé par le maar-3 de Gergovie-ouest au NO des Gardettes. Sur cette image, l'îlot pyroclastique de 606 à 665 m, d'un seul tenant et dominant à l'Ouest le chemin Gergovie-Oppidum, sépare les deux bassins de remplissage sédimentaire intracratérique (BSE et BSO) du maar-1 de Gergovie-nord. On peut également observer le deuxième remplissage intracratérique « m2 -m » des marnes à Mélanies recouvrant l'îlot pyroclastique et le chenal occidental « m1-K+m1-C ». Enfin la basanite à analcime « m2-βa » vient tout recouvrir. 3 profils d'érosion suivie de dépôt sédimentaire par emboîtement sont mis en évidence sur la face occidentale du bassin de remplissage gréso-calcaire intracratérique occidental (BSO, les Gardettes). Ces évènements se sont déroulés de l'Aquitanien supérieur au Burdigalien inférieur

Fig. 29 (photo 03): General view taken from the summit of Puy de Jussat (outcrop Af5, see aerial photo 03, page 40) on the south of maar-1 of Gergovie-north and south of maar-3 of Gergovie-west. In forefront, one can observe the peperites of maar-3 extending from Gergovie-west to the Goules path (Af4-2 and Af4-3). This image shows the maar-1 of Gergovie-north cut by maar-3 of Gergovie-west to the north-west of Les Gardettes. On the western side of the pyroclastic islet, one can observe the succession of three stages of erosion followed by sedimentary deposits. These events occurred between the Upper Aquitanian and the Lower Burdigalian, by successive interlocking.

relief sur le versant occidental. Des calcaires en petites plaquettes (« m1-C ») se déposent sur ces niveaux gréseux au niveau des Gardettes ; leur âge est aquitanien supérieur, d'après des fossiles de mammifères de Gergovie.

Ce premier remplissage occidental se termine par la brèche de calcaire silicifié partiellement travertinisé (travertin stromatolithique) trouvé à 660-665 m d'altitude dans la montée vers l'Oppidum. Ce faciès semble être le témoin d'un violent séisme tardif (Pliocène ou Pléistocène) qui fracture le sol en de multiples cassures multidirectionnelles de très faible ampleur, sans déplacement de matériaux.

Parallèlement, au même niveau altimétrique et 80 m à l'Est des « grès roses », le remplissage débute à l'Est par des argiles ocre, puis des calcaires gréseux ocre, puis des sables argileux roux surmontés de calcaires marneux oolitiques et de marnes vertes graveleuses. Ce remplissage oriental (BSE) de marno-calcaires (« m1-M ») domine tout le talus, de la « Rue de Prat » jusqu'au Nord des Rocs Rouges. Des marno-calcaires et du calcaire micritique compact affleurent de façon discontinue le long de la « Rue de Prat » et au Nord du piton bas des Rocs Rouges, de 605 m jusqu'à 590 m d'altitude, dans le chemin (point-côté-604 m) descendant vers Pérignat-lès-Sarliève (« Ravin de Vazilhat »). Ce bassin sédimentaire oriental marno-calcaire fait 912 m de long, 190 m de large au Sud et ~25-30 m d'épaisseur dans sa partie effilée.

Pour résumé : le premier remplissage sédimentaire (« m1 ») a eu lieu durant l'Aquitanien supérieur, vers -21 Ma. La présence de fragments de basalte dans les « grès rose » (« m1-K »), démontre un volcanisme basaltique précoce (i.e. Aquitanien supérieur). Sur son versant occidental, les grès roses « m1-K » et les calcaires « m1-C » sont érodés sur 15 m de haut, avant d'être noyés par les marnes de la phase suivante.

Phase-3 : Deuxième remplissage sédimentaire intracratérique de marnes à Mélanies, Trapa pomeli et 62 espèces de flore de cryptogames et de phanérogames « m2-m » - Burdigalien inférieur (-20,4 Ma)

Au-dessus des calcaires (« m1-C »), des grès roses (« m1-K »), des produits de maar « PMa » et des pépérites massives du versant SSE du plateau, il se dépose 53 m de marnes grises et blanches à Mélanies, Trapa pomeli et une flore (62 espèces) très riche en cryptogames et phanérogames. Ces terrains constitueront plus tard le substrat sur lequel s'est épanchée la basanite sommitale du plateau de Gergovie.

Ces marnes à Mélanie sont présentes dans le puits creusé en 1994 au point-côté 638 m, au NNE du plateau de Gergovie (Vidal et Goër, 2001) et le long des bordures est et SE du plateau. Les marnes à Trapa pomeli ont été trouvées à la cote 640 m (Af2-16) à l'Ouest des grès roses (« m1-K ») des Gardettes (Legrand, inédit). Il y a une différence d'une dizaine de mètres d'épaisseur de ces marnes entre les versants sud et nord du plateau de Gergovie. Cette variation d'épaisseur est due à la faille « Fa » (N304°- 56° NE.) du Puy de Mardoux qui affecte le socle granitique, le substratum oligocène et les couches du maar-1 de Gergovie -nord, sans affecter les maar-2 et maar-3.

Phase-4 : Érosion des terrains miocènes inférieurs à Gergovie

Les « grès roses » (« m1-K »), les calcaires (« m1-C ») du premier remplissage sédimentaire (BSO) des Gardettes, perchés à 630-655 m sur le versant SE du plateau de Gergovie, et les marnes burdigaliennes (« m2-m ») sus-jacentes (640 à 693 m) sont érodés sur une épaisseur de 108 m relativement aux terrains oligocènes du Nord de Gergovie, localisés à 585 m d'altitude. Cette phase a eu lieu entre le Burdigalien inférieur et le Burdigalien moyen-inférieur, avec une période d'érosion importante, vers -20,44-20 Ma.

Phase-5 : Mise en place de la coulée basaltique du Nord et du sill basaltique au NNE de Gergovie - Burdigalien moyen-inférieur (-20 MA)

Cette étape est marquée par l'émission de magma basaltique le long des parois à l'Est et au Sud du maar-1 de Gergovie-nord, sous la forme d'un sill ou filon-couche épais de ~15-20 m atteignant 10 à 30 m de large et 1,1 km de long dans la direction Nord-Sud, et d'une coulée basaltique de 275 m (SE -NO) de long, sur 43 m de large au Nord de Gergovie. Ce basalte est représenté actuellement par 4 lambeaux distincts séparés par des fractures transverses. Le magma basaltique coupe l'Oligocène au NE de Gergovie, entre 548 m à 585 m d'altitude, et recouvre le sédimentaire oligocène (« g2-M ») du Nord de Gergovie sous forme d'une coulée comprise entre 585 à 600 m. A l'extrémité nord, vers le « Ravin de Vazilhat », ce basalte pénètre à 600 m d'altitude dans le calcaire micritique du premier remplissage sédimentaire (« m1-M »), c'est-à-dire à l'intérieur du cratère du maar-1 de Gergovie-nord. La coulée et le sill basaltique ont une composition de basalte labradorique à olivine (Michel, 1953).

Phase-6 : Explosion du maar-2 du Puy de Mardoux - Burdigalien moyen-supérieur

Une fracture orientée ESE s'ouvre vers les Rocs Rouges, en plein milieu du côté oriental du maar-1 de Gergovie-nord. Ensuite, le maar-2 du Puy de Mardoux (325*500 m) s'installe avec d'importantes projections fines encore visibles sur les versants sud et sud-ouest, sur environ 100 m d'épaisseur, recoupant à l'emporte-pièce le sill basaltique de la bordure du maar-1 et le premier remplissage sédimentaire calcaire (« m1-M »).

L'activité se prolonge avec la très important éruption phréatomagmatique de pépérites massives qui rejoignent la grande masse des pépérites massives du maar-1 au SO.

Les figures 30 à 32 montrent l'intrusion du maar-2 du Puy de Mardoux dans la bordure orientale du maar-1 de Gergovie-nord. L'activité devient strombolienne avec émission d'un magma basaltique scoriacé mélangé aux blocs du substratum oligocène, observable dans les deux pitons des Rocs Rouges à la bordure ONO du maar-2. Ce mélange s'est infiltré dans la grande fracture ouverte N304°-56°NE, formant un très gros dyke basaltique qui perce, à l'Est et en dehors du cratère, le substratum marno-calcaire oligocène, jusqu'à 500 m d'altitude, soit 15 m plus bas que le rebord du maar-2 et sur 50 m d'intrusion latérale dans l'Oligocène (Photo aérienne 10, Fig. 42). La longueur totale du dyke est de 512 m.

Fig. 30 (photo 04) : Vue générale sur le maar-2 du Puy de Mardoux et l'est du maar-1 de Gergovie-nord. Dans le centre-droit de la photo, la forme en « V » inversé représente la structure intrusive du maar-2 du Puy de Mardoux dans la paroi orientale du maar-1. Les marnes à Mélanies (« m2-m ») constituent la couverture sédimentaire au-dessus des produits du maar-1 de Gergovie-nord ; puis elles sont recouvertes par la basanite à analcime (« m2-βa ») du plateau de Gergovie. La dépression de la « Rue de Prat » (DP-RP) est bien visible : à sa gauche, le bassin sédimentaire intracratérique oriental marno-calcaire (BSE) est plus développé, alors qu'il forme une bande de placage à droite (sous le repère « MAAR-1 »). Sur la gauche de l'image nous distinguons de bas en haut :

- le substratum Oligocène du Chattien,
- le sill basatique,
- les pépérites du maar-1 de Gergovie-nord,
- le premier remplissage sédimentaire intracratérique oriental marno-calcaire,
- l'îlot pyroclastique,
- le deuxième remplissage sédimentaire marneux,
- le basalte à analcime formant Le plateau de Gergovie.

Fig. 30 (photo 04): General view of the maar-2 of Puy de Mardoux and the eastern part of maar-1 of Gergovie-north. *In the center-right part of the picture the inverted V-shaped form represents the intrusive structure of the maar-2 Puy de Mardoux in the eastern wall of the maar-1. The Mélanie marls "m2-m" constitute the sedimentary cover emplaced over the maar-1 products of Gergovie-north; then they were covered by basanite with analcime "m2-βa" of the Gergovie Plateau. The depression of the "Rue de Prat" (DP-RP) is clearly visible: on the left, the eastern marl-limestone (BSE) intracratal sedimentary basin is more developed, whereas it forms a narrow strip on the right (below the "MAAR- 1" mark).*

- *On the left of the image one can distinguish from bottom to top:*
- *the Oligocene (Chattian) basement,*
- *the basaltic sill,*
- *the peperites of maar-1 of Gergovie-north,*
- *the first intracrateric sedimentary filling made of marl-limestone,*
- *the pyroclastic island,*
- *the second marly sedimentary filling,*
- *the basanite flow with analcime which forms the Gergovie Plateau.*

Fig. 31 (photo 05) : Vue générale sur le Puy de Mardoux, détaillant les deux carrières de basalte au SE (Af3-6 et Af3-7) et le dyke basaltique. Nous observons l'intrusion du maar-2 du Puy de Mardoux à la bordure orientale du maar-1 de Gergovie-nord. La limite entre les deux maars est matérialisée par les étoiles jaunes. La faille du Puy de Mardoux (« Fa ») est également mise en évidence. La partie inférieure de l'image est occupée par le bassin Oligocène. La partie supérieure expose les marnes à Mélanies (« m2-m ») qui recouvrent les produits du maar-1 de Gergovie-nord et son à leur tour recouvertes par la coulée sommitale de basanite à analcime primaire (« m2-βa »).

Fig. 31 (photo 05): General view of the Puy de Mardoux*, showing the two basalt quarries to the south-east and the basalt dike of Puy de Mardoux. The intrusion of the maar-2 Puy de Mardoux in the eastern edge of the maar-1 of Gergovie-north is well exposed. The boundary between the two maars is underlined by yellow stars. The fault of Puy de Mardoux "Fa" is also highlighted. The lower part of the image is occupied by the Oligocene basin. The upper part of the picture exposes the Melanie marls "m2-m" which cover the products of the maar-1 of Gergovie-north, then in turn being covered by the upper flow of basanite with primary analcime ("m2-βa").*

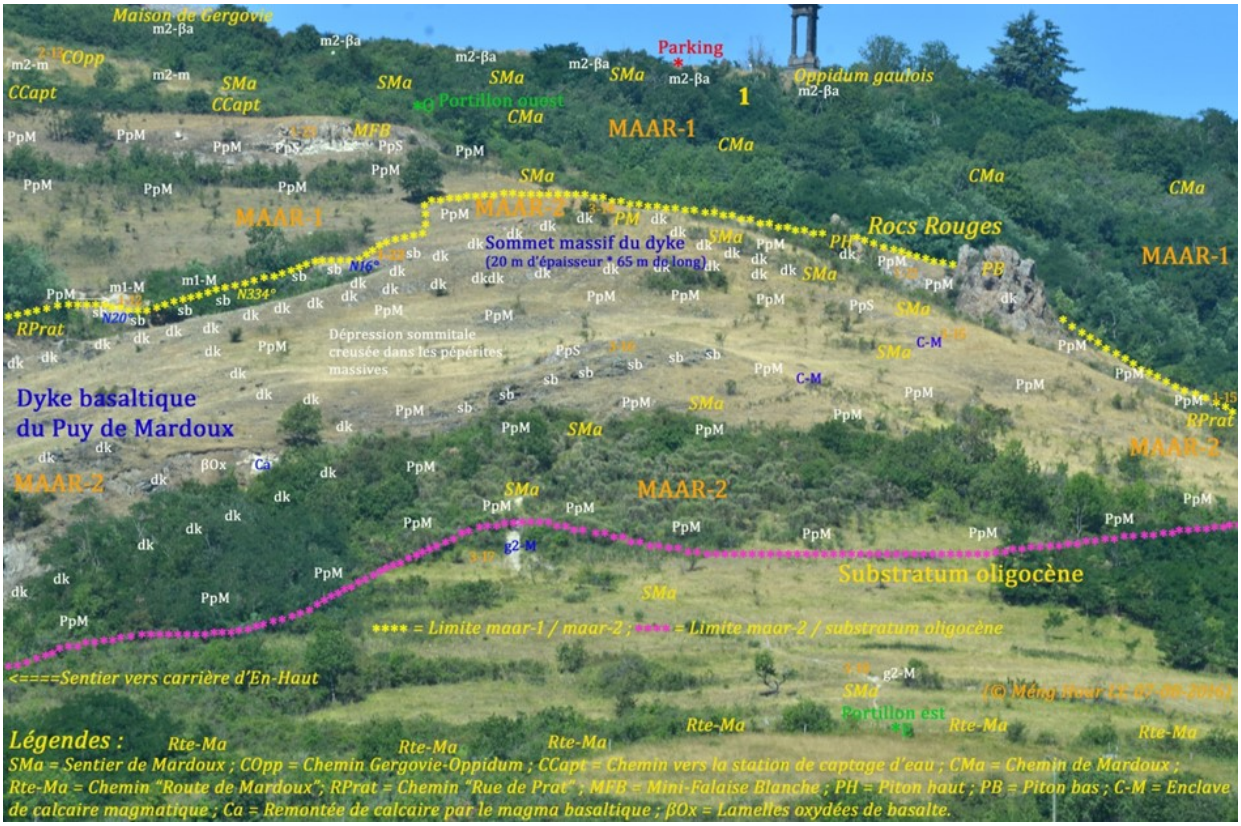


Fig. 32 (photo 06) : Face est du Puy de Mardoux, dominée par le petit promontoire de sill basaltique et de pépérites stratifiées (Af3-16). Nous pouvons observer la dépression creusée dans les pépérites massives dominées par le sommet massif du dyke du Puy de Mardoux.

Fig. 32 (photo 06): Eastern face of Puy de Mardoux, *with the small promontory of basaltic sill and stratified peperites at its top (Af3-16 outcrop). The depression located in the massive peperites is dominated by the massive summit of the Puy de Mardoux dike.*

Les pépérites du maar-2 contiennent beaucoup d'intrusions de magma basaltique :

- un mini-sill de 1x12 m interstratifié dans les pépérites stratifiées et massives en cours de solidification au Sud du Puy de Mardoux, à 550 m d'altitude ;
- un autre sill d'une dizaine de mètres d'épaisseur à l'Est du Puy de Mardoux ente 545 et 560 m d'altitude rejoignant le dyke principal basaltique du Puy de Mardoux ;
- un 3ème sill long de 83 m et de quelques mètres de largeur et d'épaisseur, de 600 à 630 m d'altitude sur la bordure SO. du maar-2 (49 m orienté N16°, 24 m orienté N334° et 10 m orienté N20°). Ce sill comporte un mince dyke moins d'un mètre de large orienté N86° à son extrémité septentrionale ; (Photo 10, fig. 48).
- un dyke basaltique avec pendage N350° - 75°E de 2~3 m de large sur une dizaine de mètres de long à 590 m d'altitude à 25 m à l'ONO du sommet PC-601 m du Puy de Mardoux, tout près du sentier de Mardoux.

Nous avons trouvé sur une faible superficie, dans le sentier ENE du Puy de Mardoux vers 560 puis 570 m d'altitude, du carbonate magmatique avec sa couleur blanc-rose saumon, sensible au test d'acide chlorhydrique et à aspect de calcaire recristallisé, non détritique. Ce carbonate témoigne une activité magmatique carbonatitique dans un contexte phréatomagmatique.

La faille N304°- 56° NE est mise en évidence sur le rebord OSO du dyke principal du Puy de Mardoux, où nous observons des couches oligocènes basculées par paliers successifs dans le sens de la faille (de type normal) suite à la montée du magma basaltique suivant un plan oblique. Ce dyke montre des circonvolutions pénétrant dans les structures pépéritiques. (Photos 17-18, fig. 55).

La mise en place du dyke du Puy de Mardoux pourrait être contemporaine de l'activité basaltique de Roudadoux, datée à -18,3 ± 0,6 Ma (datation Cantagrel et Jamond) (Ly, 1982).

Le Puy de Mardoux et son dyke basaltique s'imposent par sa structure intrusive dans le paysage de l'Est du plateau de Gergovie, protégeant ainsi le versant contre l'érosion depuis le Burdigalien moyen-supérieur. Il n'y pas eu de remplissage sédimentaire intracratérique dans le maar-2 du Puy de Mardoux (Photo 06, fig. 32).

<u>Phase-7 : Explosion du maar-3 de Gergovie-ouest - Burdigalien supérieur</u>

Enfin, la dernière phase du phréatomagmatisme de Gergovie est marquée par la mise en place du dernier grand cratère, le maar-3 de Gergovie-ouest, avec des produits de maar plus typiques que celles des maars orientaux : pépérites finement stratifiées et pépérites massives. (Photos 12-13, fig. 51-52).

Les retombées sont plus riches en éléments de socle granitique. Les premières explosions ont eu lieu dans les couches sédimentaires oligocènes et miocènes pour finir

dans le socle hercynien granitique plus profond.

Ce maar-3 fait environ 125 m d'épaisseur à son apogée et 1400 m de diamètre. La bordure méridionale du maar-3 est localisée vers 600 m d'altitude dans le chemin des Goules, dans le domaine de la ferme des Goules. Ce maar-3 de Gergovie-ouest entaille la bordure occidentale du maar-1 de Gergovie-nord au NW des Gardettes.

L'activité du maar-3 date de -17 à -16,5 Ma. Les explosions du maar-3 de Gergovie-ouest atteignent le socle granitique situé à ~700-500 m sous la surface du plateau.

La mise en place du long sill basaltique et les explosions des maars du Puy de Mardoux et de Gergovie-ouest semblent s'être déroulée autour de -19,5 à -16,5 Ma, du Burdigalien moyen-inférieur au Burdigalien supérieur, donc sur un intervalle de ~3 Ma.

Phase-8 : Érosion du maar-3 de Gergovie-ouest et sédimentation de sables feldspathiques - Burdigalien supérieur

Cette période correspond à une phase d'érosion importante des parties hautes et du « tuff ring » du maar-3 de Gergovie-ouest. La différence de dénivelé entre la pointe occidentale du plateau (734 m) et son extrémité orientale (693 m), avant la phase basaltique suivante est de 41 m, témoignant d'une pente moyenne de 2,65% dans le sens ouest → est (thalweg). A l'Ouest se déposent des sables feldspathiques (« m2-k ») sur 5 m d'épaisseur. Ces sables ont pour origine les arènes granitiques des environs de Saulzet-le-Chaud.

Phase-9 : Installation de la coulée du basalte de Gergovie - Burdigalien terminal à -15,97 Ma

Pour terminer, la basanite à analcime primaire (« m2-βa ») forme une grande et unique coulée recouvrant tout le maar-3 à l'Ouest et débordant sur les marnes miocènes burdigaliennes à l'Est. Cette coulée fait 22 m d'épaisseur continue à son extrémité orientale (Sondages géothermiques d'Auvergne Forage, 2015) ; elle fait 1550 m de long et 637 m de large, épousant le paléo-thalweg précédent. Sa base est mesurée à 693 m en-dessous de la pointe ESE du plateau (données des sondages). La coulée inférieure de basalte au sommet du plateau a disparu.

Cette coulée basaltique ne semble pas provenir du Puy Giroux, en raison de la grande différence chimique de la lave (Tableau 4,). De même, pour des raisons de différences chimique et altimétrique, elle ne peut provenir des Rizolles comme le propose Michel (1953) (repris par d'autres auteurs). Il faut donc chercher d'autres origines. La sortie sur place à l'Est du point-côté 745 m peut être envisagée puisqu'une zone de sols rouges est observable en photo aérienne sur 70*100 m à l'Est du point culminant occidental (745 m).

Plus tard, le terrain a été occupé par les gaulois durant des siècles. Il a été le théâtre d'une bataille de la Guerre des Gaules en -52 av JC, qui opposa les Gaulois menés par Vercingétorix et l'armée de Jules César. Le plateau de Gergovie est aujourd'hui un site archéologique protégé qui dépend de la MAB (Musée Archéologique de la Bataille) de Gergovie.

Le tableau 3, présenté dans deux versions : une française et une anglaise, synthétise les résultats détaillés plus haut.

3.3 Résumé des phénomènes volcanosédimentaires du plateau de Gergovie

C'est grâce au sill basaltique du chemin « Rue de Prat » (1,1 km de long orienté sud-nord), au dyke du Puy de Mardoux (0,51 km de long orienté SE-NO) et là a coulée du plateau de Gergovie (1,5 km de long orientée OSO-ENE), que les structures phréatomagmatiques du plateau de Gergovie ont été si bien conservées. Cette bonne conservation nous a permis de suivre « à la trace » l'histoire géologique du plateau de Gergovie durant ses 12 Ma d'activité volcanique et sédimentaire. Cet exemple est probablement unique au sein du volcanisme de France.

L'Oligocène s'achève au Chattien (-27,82 Ma) par des dépôts lacustres, essentiellement marno-calcaires. On y trouve une faune très riche : mammifères, reptiles, oiseaux, planorbes, hélices, ostracodes, phryganes … Une faune de mammifères (rhinocéros) et de micro-mammifères datée vers -24 Ma (Oligocène terminal) a également été trouvée au NE du point-côté 558 m sur la Colline de La Roche Blanche, qui se trouve en dehors du cadre des cartes citées plus bas au point F2 de la photo aérienne 04, fig. 36 (et décrit dans Hugueney *et al.* 1999).

Le maar-1 de Gergovie-nord (centre de la fig. 1 et fig. 18-19), daté de l'Aquitanien inférieur (-23,03 Ma), a explosé dans du substratum Oligocène selon un axe sud-nord sur 1,54 km de long et 0,78 km de large. Les sédiments intracratériques se sont déposés selon cet axe sud-nord avec un îlot pyroclastique (606 à 665 m) le divisant en deux (fig. 18) : 1/ grand bassin (912 m de long) marno-calcaire à l'Est (BSE) ; 2/ chenal gréso-calcaire à l'Ouest (BSO). L'îlot pyroclastique se situe actuellement au niveau du « chemin vers la station de captage d'eau potable », prolongé par le « chemin de Mardoux ». Des mammifères de cette époque (Aquitanien supérieur, ~-21 Ma) se trouvent dans les calcaires du chenal occidental (BSO), coiffés de marnes à Mélanies, Trapa pomeli et une flore de cryptogames-phanérogames (62 espèces). Ces derniers dépôts sédimentaires marneux datent du Burdigalien inférieur (-20,44 Ma). Ensuite, une érosion importante (108 m de décapage) s'opère dans les terrains sédimentaires intracratériques (Aquitanien et Burdigalien inférieur), puis le sill basaltique de Gergovie se met en place au Burdigalien moyen-inférieur (~-20 Ma). Cette intrusion opère via des fractures périphériques situées à l'Est et au Sud du maar-1, construisant un mur rocheux de 1,1 km de long en direction sud-nord et 275 mètres de large, sous forme d'une couléede direction SE-NO.

Au Burdigalien moyen-supérieur (vers -19 à -18 Ma), le maar-2 du Puy de Mardoux (325x500 m) (Photo aérienne 08, fig. 40) s'installe sur la bordure orientale du maar-1 de Gergovie-nord ; il recoupe le maar-1 à l'emporte-pièce (Photo 09, fig. 47). Lors de cet événement, le sill basaltique de la paroi orientale ainsi que le long bassin sédimentaire marno-calcaire (BSE) aquitanien supérieur à l'Est sont

coupés en deux. Les deux cheminées des Rocs Rouges et le grand dyke de Puy de Mardoux façonnent le paysage en laissant une imposante structure phréatomagmatique, basaltique et carbonatitique, sans dépôts sédimentaires intracratériques. (Photo 21, fig. 58).

Au Burdigalien supérieur (-17 à -16,5 Ma), l'activité phréatomagmatique se déplace à l'Ouest, creusant un énorme cratère de 1,4 km de diamètre, laissant 125 mètres de débris pyroclastiques sur les versants sud et sud-ouest du plateau. Ainsi la paroi occidentale du maar-1 de Gergovie-nord et ses couvertures sédimentaires (Aquitanien supérieur et burdigalien inférieur) sont détruites. Il n'y a pas de construction d'édifice basaltique au cours du maar-3 de Gergovie-ouest. Les explosions de ce maar-3 affectent le socle granitique situé au moins à ~ -700 à -500 m sous la surface du plateau. Puis une brève érosion creusant un thalweg ouest-est (pente = 2,65 %) permet le dépôt des sables feldspathiques issus de la bordure occidentale de la Limagne (région de Saulzet-le-Chaud). C'est par ce même réseau hydrographique que l'unique grande coulée de basanite à analcime comble cette paléo-vallée à la fin du Burdigalien (-15,97 Ma). Nous ne savons rien du volcan d'origine de cette coulée basaltique du plateau de Gergovie. Il est donc à trouver, fruit possible de futures recherches.

Enfin, depuis le Langhien jusqu'à nos jours, l'érosion s'installe avec des très importants glissements de terrains en masse (jusqu'au Puy d'Aubière), offrant ainsi le paysage que nous connaissons actuellement. (Vidal et Goër, 2001).

Remerciements

Nous remercions Francine Mercier-Batard et Nathalie Vidal de la Société d'Histoire Naturelle d'Auvergne qui ont accepté de publier la synthèse de ce document portant sur les circuits d'excursion du plateau de Gergovie. Pierre Boivin du Laboratoire Magmas et Volcans qui nous a donné de précieux conseils et des critiques constructives et participé activement aux recherches bibliographiques et d'informations annexes. Denis Tourlonias, de l'ASG, a accepté de publier un résumé de ce travail dans le Bulletin de l'Association du Site de Gergovie. Denis Thiéblemont (BRGM), en charge de l'édition de la carte géologique de la France, nous a fourni une aide matériel (lames minces) et éditoriale pour la publication de notre étude dans la revue Géologie de la France. Philippe Chèvremont (retraité BRGM) a participé aux excursions des 09 & 10 mai 2012 et a contribué activement (fourniture de photos originales) à l'amélioration du document. Philippe a été notre correspondant au BRGM pour les diagnoses de lames minces et a réalisé toutes les microphotographies. Jean-Marc Baele, Professeur de Géologie Appliquée de l'Université de Mons en Belgique, a commenté les microphotographies de la brèche de calcaire silicifié du chemin Gergovie-Oppidum et identifié les stromatolithes. Jean-Marc a réalisé une étude approfondie de ces stromatolithes incluant de magnifiques microphotographies et une diffractométrie aux rayons X. Jean-Louis Poidevin, du LMV, nous a fourni de précieuses informations sur le site de La Roche Blanche et de Gergovie. Cécile Mourer, notre ancienne Professeure de Paléontologie du l'Université de Phnom Penh et désormais collaboratrice de l'Université de Lyon, a fait les recherches bibliographiques nécessaire à la détermination des correspondances paléontologiques et âge des sites « F1 à F3 ». Des remerciements plus complets figurent dans notre ouvrage (Ly, 2019).

Enfin, nous dédions la totalité de ce travail à **Chhun Buoy Péng**, notre épouse, pour son soutien moral et son amour, qui supporte notre passion pour la Géologie bien que cette discipline ne nous ait pas apporté le travail permettant de faire vivre la famille. Buoy a partagé sur le terrain nos explications des phénomènes géologiques et participé activement à la mise en forme et les dernières corrections de ce document, **tout comme une édition à deux**.

Age en MA	Étage géolo-gique	Événements géologiques à Gergovie	Image de photos représentatives
-15,97	Burdigalien terminal	Épanchement de la coulée de basanite du plateau de Gergovie « m2-βa »	
-16,5	Burdigalien supérieur	Dépôt de sables feldspathiques « m2-k »	
-17 à -16,5	Burdigalien supérieur	Explosion du maar-3 de Gergovie-ouest	
-19 à -18	Burdigalien moyen-supérieur	Explosion du maar-2 du Puy de Mardoux, puis installation du volcan strombolien des Rocs Rouges et du dyke du Puy de Mardoux	
-20	Burdigalien moyen-inférieur	Montée du magma basaltique « m2-β(sb » constituant le sill du nord-nord-est et la coulée septentrionale de Gergovie.	
-20,44 à -20	Burdigalien inférieur à Burdi-galien moyen-inférieur	Érosion des terrains aquitanien supérieur et burdigalien-inférieur sur 108 m de haut	
-20,44	Burdigalien inférieur	Dépôt des marnes à Mélanies, Trapa pomeli et une flore de 62 espèces de cryptogames et phanérogames « m2-m » (Remplissage sédimentaire n° 2).	
-22 à -20,5	Aquitanien supérieur	Remplissage sédimentaire n° 1, par les grès roses « m1-K », les calcaires fossilifères « m1-C » des Gardettes, la brèche de calcaire silicifié à stromatolithe du chemin de l'Oppidum et les marno-calcaires « m1-M » le long de la rue de Prat.	
-23,03	Aquitanien inférieur	Explosion du maar-1 de Gergovie-nord	
-27,82	Chattien	Dépôt sédimentaire lacustre oligocène « g2-K + g2-R + g2-M »	

Numerical age (Ma)	Stage	Geological events in Gergovie	Image of representative photos
-15.97	Burdigalian terminal	Effusion of the basanite flow of the plateau de Gergovie "m2-βa"	
-16.5	Upper Burdigalian	"m2-k" feldspathic sand deposit	
-17 to -16.5	Upper Burdigalian	Explosion of the maar-3 of Gergovie-west	
-19 to -18	Upper-medium Burdigalian	Explosion of the maar-2 Puy de Mardoux, then installation of strombolian volcano Rocs Rouges and the dike Puy de Mardoux	
-20	Lower-medium Burdigalian	Rise of the basaltic magma "m2-β(sb") constituting the north-north-east sill and the northern flow of Gergovie	
-20.44 to -20	Lower-Burdigalian to Lower-medium Burdigalian	Erosion of the Upper Aquitanian and Lower Burdigalian terrains over 108 m high	
-20.44	Lower-Burdigalian	Deposit marls Melanies, Trapa pomeli and flora (cryptogamous and phanerogamous) "m2-m" (sedimentary filling n° 2).	
-21	Upper Aquitanian	Sedimentary filling n ° 1, by the "pink sandstone "m1-K", the "m1-C" fossiliferous limestones of the Gardettes, the siliceous limestone breccia with stromatolite of the path of the Oppidum and the marl-limestone "m1-M" along the path « Rue de Prat ».	
-23.03	Lower Aquitanian	Explosion of the maar-1 of Gergovie-north	
-27.82	Chattian	Oligocene lacustrine sedimentary deposit "g2-K + g2-R + g2-M"	

Tabl. 3 : Résumé des événements volcaniques et sédimentaires ayant affecté la région de Gergovie au Miocène.

Tabl. 3: Summary of the Miocene volcanic and sedimentary events in the Gergovie area.

BIBLIOGRAPHIE

Boivin P., Besson J. C., Briot D., Deniel C., Gourgaud A., Labazuy P., Langlois E., Larouzière F.-D. de, Livet M., Médard E., Merciecca C., Mergoil J., Miallier D., Morel J.-M., Thouret Jean C. et Vernet G. (2017) - Volcanologie de la Chaîne des Puys. Carte au 1/25 000, format 120x90 cm, notice 200 p., EAVUC, Université Blaise-Pascal - Clermont-Ferrand, 6ème Edition. Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Montlosier.

Chazot G., Mergoil-Daniel J. (2012) - Co-eruption of carbonate and silicate magmas during volcanism in the Limagne graben (French Massif Central). Lithos 154 p. 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. Thèse d'Université, Spécialité Volcanologie, Université de Clermont Ferrand. 209 p.

Chèvremont P. *et al*. (à paraître) - Notice explicative (chapitre 03 V3 volc_m1-4). Carte géologique de France (1/50.000), feuille Veyre-Monton (717) BRGM Orléans.

Chazal (inédit) - Rapport des logs de 11 sondages géothermiques à 10 m de chaque sur un carré au Sud de la Maison de Gergovie. Fin 2015, Société Auvergne Forage.

Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P. L. et Fan J.-X. (2019) - The ICS International Episodes 36 : 199-204 (2013 Update). May 2019. IUGS. (www.stratigraphy.org).

Degeai J.-P. et Pastre J.-F. (2008) - Evolution morpho structurale du plateau volcano-sédimentaire de Gergovie au Miocène inférieur ; implications géodynamiques sur la phase tardive du rift de Limagne (Massif Central, France) – Rev. Can. Sci. Terre 45 : 640-650.

Giraud J. (1902) - Etudes géologiques sur la Limagne (Auvergne), Bulletin de la Carte Géologique de la France n° 87. TOME XIII (1902-1903), Avril 1902, 410 p.

Goër de Herve A. (de) (1993, inédit) - Schéma des structures de maar, avec exemple des maars de l'est du plateau de Gergovie et du Puy de Mardoux.

Hugueney M., Poidevin J.-L., Bodergat A.-M., Caron J.-B. et Guérin C. (1999) - Des mammifères de l'Aquitanien inférieur à La Roche-Blanche-Gergovie (Puy-de-Dôme, France), révélateurs de l'activité post-oligocène du rift en Limagne de Clermont. C. R. Acad. Sci. Paris. Science de la terre et des planètes. 328. 777-852.

Jeambrun M., Giot D., Baudry D. et Camus G. (1973) - Carte géologique au 1/50.000, n° 693, feuille de Clermont-Ferrand. BRGM.

Ly M.-H. (1982) - Le Plateau de Perrier et la Limagne du sud : Etudes volcanologiques et chronologiques des produits montdoriens. Thèse de Doctorat de 3ème Cycle, Université Blaise-Pascal de Clermont Ferrand, 180 p.

Ly M.-H. (Inédit) - Levé de la carte géologique feuille Veyre-Monton 3-4 au 1/25.000 en 1983, BRGM.

Ly M.-H. (Inédit) - Nouvelle interprétation volcanologique du plateau de Gergovie (17 p.) Version 1.04 (01-01-2013) accompagnée de la carte simplifiée de la feuille Veyre-Monton à Gergovie et de la coupe est-ouest du plateau de Gergovie.

Ly M.-H. (2016) - Le phréatomagmatisme du plateau de Gergovie, Revue des Sciences Naturelles d'Auvergne, Volume 80, pp. 87-138, ISSN = 0373-2851.

Ly M.-H. (2018) - Volcanisme du plateau de Gergovie, Bulletin de l'Association du Site de Gergovie, n° 39 de novembre 2018, pp. 12-41.

Ly M.-H. (2019) - Phréatomagmatisme du plateau de Gergovie, de Jussat et du Puy Giroux (Massif Central Français). Imprimerie de la Sèvre - Niort, ISBN = 978-2-9562392-0-8, 220 p.

Ly M.-H. (2021) - Phréatomagmatisme et phénomènes volcano-sédimentaires au plateau de Gergovie (Massif Central Français) au Miocène inférieur. Imprimerie de la Sèvre - Niort, ISBN : 978-2-9562392-1-5, 360 p.

Michel R. (1948) - Étude géologique du plateau de Gergovie. Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle d'Auvergne 4, GIF Roanne France, 68 p.

Michel R. (1953) - Contribution à l'étude pétrographique des pépérites et du volcanisme tertiaire de la Grande Limagne. Mémoires Société Histoire Naturelle d'Auvergne n° 5. 140 p.

Peterlongo J.-M. et Goër de Herve A. (de) (1978) - Guides géologiques régionaux du Massif Central, Editions Masson et Cie, p. 101 à 104.

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 de l'Université de Clermont Ferrand. 120 p.

Saint-Joanis R., Tricot B., Bouiller R., Giot D. et Jeambrun M. (1982) - Carte géologique au 1/50.000, n° 718, feuille d'Issoire. BRGM.

Tricot B. (1975) - Le Volcanisme de la Comté d'Auvergne (Massif Central Français). Thèse de Doctorat de 3ème Cycle de l'Université de Clermont-Ferrand. 117 p.

Valentine G.-A., Van Wyk de Vries B. (2014) - Unconventional maar diatreme and associated intrusions in the soft sediment-hosted Mardoux structure (Gergovie, France). Bull Volcanol (2014) 76:807 - DOI 10.1007/s00445-014-0807-9- Springer Editions.

Vidal N., Goër de Herve A. (de) (2001) - Le Puy d'Aubière et le glissement de Gergovie. Revue de l'Association du Site de Gergovie, pp. 17 à 25.