

LabEx OSUG – APPEL À PROJETS 2022-2023 RECHERCHE et OBSERVATION « Standard-Phare » Formulaire de réponse

Contenu du dossier : une page d'information résumant l'identité du projet, description du projet, un tableau du personnel impliqué, un budget précisant les financements demandés au LabEx et les éventuels co-financements, le CV du porteur de projet (1 page maxi.), des annexes incluant le cas échéant : des devis, une fiche de poste pour un CDD, des précisions concernant le ou les stage(s) (sujet, formation, durée), grille tarifaire.

Identité du projet

Acronyme du projet	MOFETTE_LAB
Titre du projet	Caractérisation multi-physique et géochimique de la mofette de l'Escarot : vers un laboratoire naturel de l'étude des dégazages géogènes
Nom Prénom du porteur	MORDRET Aurélien
Mail du porteur	Aurelien.mordret@univ-grenoble-alpes.fr
Laboratoire(s)/équipe(s) du porteur	ISTerre / Ondes et Structures
Laboratoire(s)/équipe(s) impliqués(es)	- ISTerre / Minéralogie, Géochimie, Mécanique des failles
Type de projet <i>Cocher <u>une des 4 options</u></i>	<input checked="" type="checkbox"/> Projet Standard <u>Ou</u> <input type="checkbox"/> Projet Standard Blanc <u>Ou</u> <input type="checkbox"/> Projet Phare

Résumé du projet

Ce projet vise à étudier et surveiller le système superficiel de dégazage de CO₂ engendrant la mofette de l'Escarot (Auvergne). En combinant plusieurs approches géophysiques et géochimiques, nous allons cartographier en quatre dimensions les différents conduits de gaz dans la proche surface et les relier à la géologie locale. Les mesures géophysiques et géochimiques effectuées de manières continues ou répétées sur une durée d'un mois permettront l'estimation des variations temporelles des propriétés physiques et chimiques du milieu pour mieux comprendre l'influence de la structure du sous-sol et l'impact des forçages environnementaux. Ce projet, complémentaire de l'ANR MACIV, permettra de mieux comprendre l'activité du système volcanique le plus récent du Massif Central pour mieux en appréhender l'aléa. Ce projet permettra aussi de définir des stratégies de surveillance de dégazages multi-méthodes pour des applications en stockage industriel de CO₂ ou de prospection d'hydrogène comme énergie propre pour la transition énergétique.

Résumé du financement demandé

Nature du financement	Montant demandé en € HT (pas en k€)
Total Fonctionnement (dont stages, chercheurs invités)	35 940 €
Total Investissement/Equipement	0 €
Total Personnel IT	0 €
TOTAL	35 940 €

Le dossier devra faire apparaître les contributions pour les critères ci-dessous.

Les critères prioritaires : Qualité scientifique, Contribution aux axes thématiques (cf détail ci-dessous, sauf pour les projets blanc), Visibilité nationale/internationale.

Les critères secondaires : Contribution aux objectifs structurels (cf détail ci-dessous), Effet levier, Mutualisation, Transversalité, Interdisciplinarité, Renforcement de la dynamique du site.

Cocher les axes et/ou objectifs structurels du LabEx auxquels votre projet contribue :

Contribution aux axes thématiques (A1 à A4)

- A1. Quelles conditions pour l'émergence et le maintien de la vie sur une planète ?
 A2. Comment prendre en compte l'ensemble des aspects complexes de l'habitabilité sur terre ?
 A3. Comment concilier habitabilité et ressources limitées ?
 A4. Comment concilier habitabilité et risques naturels ?

Contribution aux objectifs structurels (O1 à O5)

- O1. Renforcer et exploiter notre implication dans les Infrastructures de Recherche EPOS, E-LTER, AnaEE, ICOS, ACTRIS, ESO, CFHT, IRAM, ESRF (FAME&FAME-UHD), Data-Terra, RéGEF ;
 O2. Renforcer nos capacités et nos expertises analytiques, exploiter les techniques de télédétection, et soutenir le développement des plateformes mutualisées ;
 O3. Renforcer nos capacités au sein de l'OSUG-DC, par exemple concernant l'exploitation et la distribution de données d'observation, le deep learning et/ou l'intelligence artificielle ;
 O4. Promouvoir l'Integrated Alpine Research System (IARS) afin de regrouper au sein de l'OSUG les recherches interdisciplinaires ayant pour objet les Alpes ;
 O5. Soutenir les grandes missions spatiales.

- A. **Pour tous les projets :** le dossier devra faire apparaître **la qualité scientifique**, qui prend en compte l'intérêt scientifique, l'originalité au-delà de l'état de l'art national et international, l'ambition scientifique et/ou technologique, la pertinence des approches et des objectifs, la faisabilité, l'adéquation des moyens humains et méthodologiques aux objectifs, les résultats scientifiques attendus, et la qualité d'organisation et calendrier. Il est requis de détailler **la contribution aux axes thématiques du LabEx en lien avec l'habitabilité** (voir descriptif plus haut, sauf pour les projets standards blancs) [Maximum 5 pages]

Description du projet et résultats attendus

Introduction

La Terre dégage naturellement de nombreuses espèces géogènes (d'origine non biologique), dont des "gaz à effet de serre" tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) ou de la vapeur d'eau (H₂O), mais aussi des éléments plus légers comme l'hydrogène natif (H₂) ou les gaz rares dont l'hélium (He). La quantification des volumes de gaz émis naturellement doit aussi être prise en compte dans les études climatiques pour mieux anticiper les conséquences à long-terme du réchauffement global (Mörner and Etiope, 2002). Ces gaz remontent depuis des réservoirs situés à des profondeurs diverses, allant du manteau supérieur à la très proche-surface (quelques dizaines de mètres de profondeur), en empruntant des conduits dont l'emplacement et la géométrie sont dictés par les contraintes tectoniques régionales et locales ainsi que par l'histoire géodynamique de la région. La majorité de ces dégazages se produisent dans des zones volcaniques actives et sont extensivement étudiés (e.g., Allard et al., 1991). Cependant, il existe aussi des zones de dégazage plus diffuses, également associées à des processus profonds, qui n'ont reçu d'attention scientifique que récemment (Bussert et al., 2017).

En Europe, outre les régions de volcanisme actif, ces provinces sont liées au système de rift Cénozoïque et au volcanisme dormant associé (Merle et Michon, 2001). On y rencontre de nombreuses mofettes, des sites d'émission de gaz où le CO₂ associé à des gaz d'origine mantellique (He, Ne, Ar) remonte par des conduits depuis les profondeurs du manteau (Bräuer et al. 2013 ; 2017). En dehors de ces zones de rifting, il existe aussi des fontaines ardentes dégageant principalement du méthane : par exemple autour du Vercors en France (Gal et al., 2018b). A noter aussi les zones d'ophiolites où l'on trouve des sources hyperalcalines saturées en CH₄ et H₂ (Etiope et al., 2019). En Europe, on retrouve des mofettes de CO₂ dans les trois grandes régions de volcanisme intraplaque recoupant le socle Varisque : la zone du rift de l'Eger (Kämpf et al. 2013), la région volcanique de l'Eifel (Krüger et al. 2011) et le Massif Central français (Gal et Gadalia 2011). Au sein de celui-ci, la seule occurrence rapportée jusqu'à présent est la mofette d'Escarot (Gal et Gadalia 2011 ; Bräuer et al., 2017; Gal et al., 2018a ; Battani et al., 2010) située à 2 km à l'ouest du lac Pavin. Il est intéressant de constater que la signature géochimique des gaz rares dans l'ensemble des provinces volcaniques du Massif Central et de l'Eifel est similaire dans les gaz des mofettes et les xenoliths provenant du manteau sous-continentale de la zone (Dunai et Porceli, 2002 ; Gautheron et al., 2005), impliquant un large réseau de structures permettant de remonter le gaz en surface. Ces mofettes constituent donc des fenêtres naturelles sur les processus magmatiques en profondeur. Elles sont toutes indiquées pour étudier les interactions CO₂/fluide/roche et comprendre les mécanismes permettant la migration rapide des gaz du manteau supérieur vers la surface. A proximité de la mofette de l'Escarot, les eaux du piézomètre ont un caractère unique chloruré sodique et acide comparées aux eaux de la région du Pavin. Les variations temporelles effectuées sur l'alcalinité et la conductivité sont décorréliées des conditions atmosphériques (Gadalia et Gal., 2010).

Par ailleurs, en tant que marqueurs de l'activité volcanique de ces régions en surface, leur étude et leur surveillance doivent s'inscrire dans les efforts d'estimation du risque volcanique et du potentiel de réactivation de ces provinces dormantes. Enfin, l'étude détaillée et multi-disciplinaire des mofettes et de leur proche environnement peut avoir des implications directes dans la résolution de deux problèmes sociétaux majeurs : le stockage géologique de CO₂ pour lutter contre le réchauffement climatique et la prospection de nouvelles formes d'énergies propres que peuvent constituer l'hydrogène natif ou l'hélium. Les mofettes peuvent ainsi servir de laboratoires naturels

afin de tester plusieurs technologies de mesure et d'élaborer ensuite des stratégies de surveillance des futurs sites industriels de stockage du CO₂. Le succès de ces stockages géologiques souterrains dépend de la sécurité du stockage du CO₂, ce qui conduit à développer des méthodologies d'alerte basées sur la surveillance de la composition des gaz du sol et de son évolution dans le temps. Aussi, un monitoring de paramètres géochimiques de l'eau (conductivité, température) a révélé être un bon traceur de l'activité sismique où circulent ces eaux (Zmazek et al., 2002). De la même façon, ces méthodes peuvent être adaptées pour la prospection d'hydrogène décarboné, un objectif de la transition énergétique soutenue par le plan d'investissement d'avenir "France 2030".

Objectifs du projet

Les objectifs de ce projet sont d'étudier et de surveiller le système superficiel de dégazage engendrant la mofette de l'Escarot. Par une approche **multi- et interdisciplinaire**, combinant plusieurs méthodes géophysiques et géochimiques, nous allons cartographier en trois dimensions les différents conduits de gaz dans la proche surface et les relier à la géologie locale et régionale. Nous investiguerons l'influence de ces structures et de leur géométrie sur la concentration, le flux et la composition des gaz dans le sol et dans l'atmosphère de manière spatialisée. Cela nous donnera des informations sur la partie la plus superficielle du système volcanique le plus récent du Massif Central, et qui viendront compléter les analyses et mesures qui seront effectuées lors du projet MACIV, un projet ANR porté par ISTerre (PI : Anne Paul, co-PI Aurélien Mordret) visant à imager les structures liées au volcanisme du Massif Central.

Les mesures géophysiques et géochimiques seront aussi effectuées de manières continues ou répétées sur une durée d'un mois pour estimer les variations temporelles des propriétés physiques et chimiques du milieu. L'influence des paramètres environnementaux tels que la température, la pression atmosphérique ou les précipitations sur les variations temporelles du milieu et des gaz sera étudiée pour démoduler ces effets des forçages purement géologiques. Les mesures géochimiques seront corrélées aux mesures géophysiques pour évaluer l'impact de l'évolution dynamique des flux et concentrations des gaz sur les mesures géophysiques. Une telle caractérisation permettra de définir des stratégies de surveillance **multi-méthodes** qui auront des applications, par exemple, pour le stockage industriel de CO₂. Ce projet servira aussi de preuve de concept pour la création d'un laboratoire naturel pour la prospection, l'étude et l'analyse de dégazages d'origine profonde avec un lien vers la prospection et l'exploitation d'hydrogène natif comme source d'énergie propre pour la transition énergétique.

Moyens mis en œuvre et calendrier

Les méthodes géochimiques et géophysiques sont généralement appliquées lors de l'exploration géologique ou environnementale pour fournir des informations sur les paramètres structuraux et les caractéristiques dynamiques du sous-sol. Les études d'émanation de gaz du sol constituent une approche géochimique qui peut être utilisée pour cartographier les différents conduits de fluides. Dans ces études, les gaz du sol sont échantillonnés à la surface ou à une faible profondeur, jusqu'à 2 m (Gal et al., 2018b ; Lefevre et al., 2021). L'utilisation de techniques de concentration et de flux de gaz du sol est un moyen simple et efficace pour la surveillance de l'infiltration de CO₂ le long de passages préférentiels. Nous prévoyons de déployer notre laboratoire mobile des gaz afin de cartographier les concentrations élémentaires en CO₂, CH₄, H₂, He, et ²²²Rn à 1 m de profondeur et sur une zone de 1 km² (Figure 1). Ce laboratoire comprend 3 types d'analyseurs de gaz différents fonctionnant tous sur batterie : un spectromètre de masse GE-MIMS (MiniRuedi), un analyseur multi-gaz GA5000 et un analyseur de Radon (Alphaguard). Nous réaliserons également un échantillonnage complémentaire ponctuel des gaz et eaux afin d'analyser la composition isotopique en gaz rares (i.e., ³He/⁴He), permettant de déterminer l'origine mantellique du gaz et de possible contamination avec

des gaz crustaux. Enfin, nous prélèverons et analyserons les eaux du piezomètre de l'Escarot ainsi que celles d'un évent à dégagement de CO₂ pour déterminer les paramètres géochimiques dissous sur une large gamme d'éléments. Le pH, la température, la conductivité, le potentiel redox seront mesurés in situ par électrochimie (WTW multi 340i) et les éléments sensibles au redox ($\Sigma\text{H}_2\text{S}$, Fe²⁺) par spectrophotométrie. Au laboratoire, les cations majeurs (B, Ca, K, Li, Mg, Mn, Na, Si, Sr) seront quantifiés par spectrométrie ICP-AES à ISTerre et les anions majeurs par chromatographie ionique à l'IGE. Les espèces carbonées (alcalinité, carbone organique dissous) seront dosées à ISTerre par titration de Gran et absorption infra-rouge. Enfin, pour compléter les données géochimiques des eaux, les résultats des éléments aqueux seront intégrés dans un programme de modélisation PhreeqC afin de déterminer les indices de saturation des minéraux susceptibles de précipiter dans le milieu géologique.

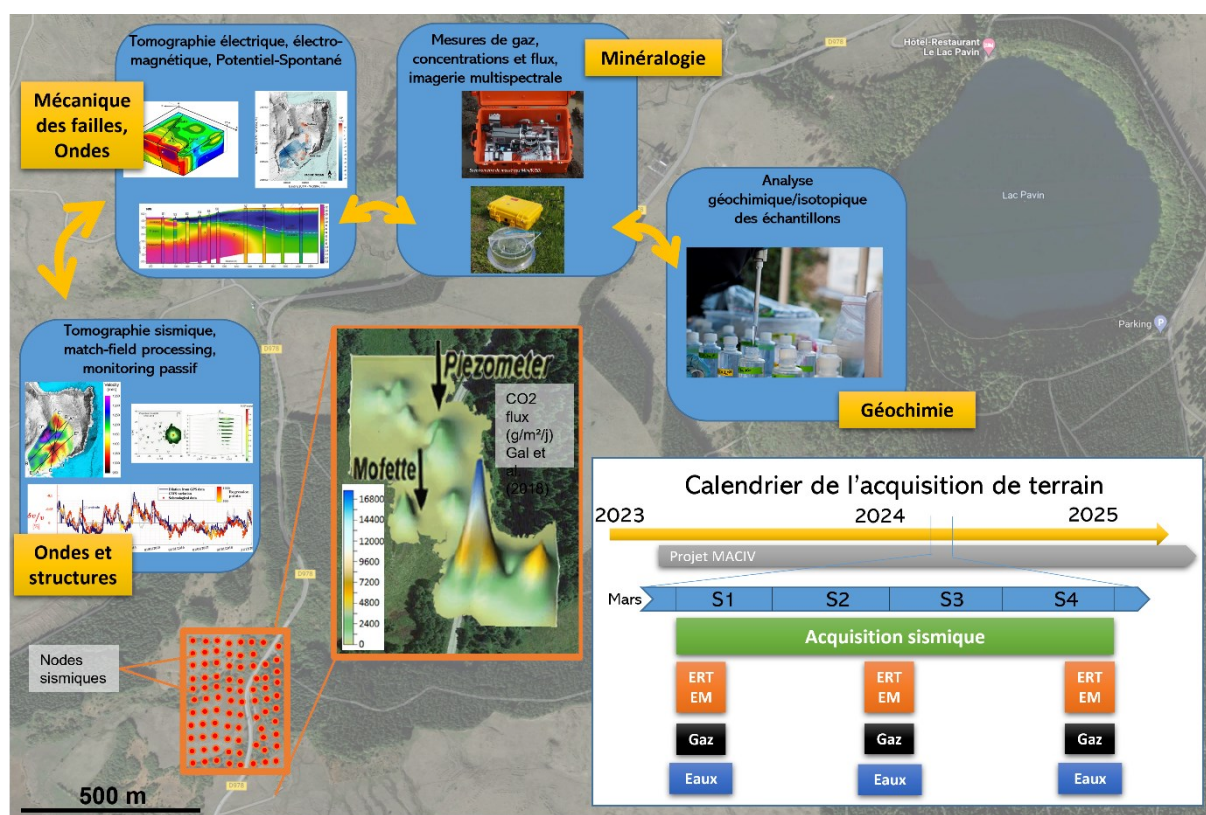


Figure 1 : Organisation de la campagne de mesures du projet. ERT = Electrical Resistivity Tomography. EM = Electromagnetic method.

Les méthodes géophysiques peuvent fournir une image des paramètres structuraux de la subsurface dans les zones de percolation du gaz à proximité de la surface, jusqu'à des centaines de mètres de profondeur. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour produire des modèles 2D ou 3D de la subsurface. Les méthodes sismiques, notamment celles basées sur des mesures passives (Mordret et al., 2013), peuvent délimiter les formations géologiques gazières grâce aux anomalies de vitesse ou d'atténuation sismique qu'elles produisent (Mordret et al., 2014). Nous prévoyons de déployer pendant un mois un réseau sismique dense de capteurs nodaux autour de la mofette d'Escarot pour réaliser une tomographie du bruit sismique ambiant de la zone (Figure 1). Les enregistrements sismiques continus seront analysés avec un algorithme de clustering non supervisé basé sur l'apprentissage profond (Seydoux et al., 2020) pour révéler les différentes sources de vibrations sismiques sur le site. La comparaison de l'heure d'occurrence de chaque cluster

d'évènements sismiques avec les mesures de gaz du sol nous permettra de détecter les périodes où la mofette est la plus active et génère le plus de vibrations sismiques. Nous utiliserons ensuite le match-field processing (Gradon et al., 2019; Umlauf et Korn, 2019) sur ces données regroupées et classifiées pour cartographier en 3D les régions sources de ces vibrations et révéler le réseau superficiel des conduits préférentielles du CO₂.

L'acquisition continue de données sismiques pendant un mois permettra de déployer des méthodes de suivi temporel passif (Brenquier et al., 2008; Garambois et al., 2019; Mordret et al., 2020; Kremer et al., 2022). En analysant les variations temporelles des vitesses et d'atténuation sismiques dans le sous-sol et en les corrélant aux mesures dynamiques de gaz, nous testerons la faisabilité d'utiliser des mesures sismiques passives pour quantifier les flux et concentrations de gaz ainsi que leurs variations dans le temps. Si cette approche s'avère prometteuse, il sera possible d'extrapoler les mesures de gaz ponctuelles par des proxy géophysiques (sismiques), plus simples et moins coûteux à obtenir de façon continue.

En complément des acquisitions sismiques, nous proposons de cartographier le site par des mesures électromagnétiques afin d'établir des cartes de résistivité électrique, à différents instants de l'expérience sismique. Cette cartographie sera effectuée avec les méthodes électromagnétiques diffusives à disposition au sein d'ISTerre : un EM 31 (Geonics) dont la profondeur de sensibilité oscille entre la surface et 5 à 6 mètres de profondeur suivant le mode utilisé (vertical/horizontal) et CMD-DUO (Gf Instruments) qui permet des acquisitions à la fois plus profondes (jusqu'à 60 m de profondeur) et mieux résolues afin d'obtenir des images 3D. Ces mesures seront complétées par des profils de résistivité électrique afin d'obtenir des images haute-résolution de la distribution de résistivité le long de profil. L'ensemble de ces données seront comparées aux images statiques issues du suivi sismique et des mesures géochimiques, la résistivité étant potentiellement plus sensible à la présence de gaz. Les variations éventuelles détectées de manière cinématique lors des différentes campagnes d'acquisitions seront également comparées à celles produites par le suivi temporel sismique et géochimique afin d'identifier leur relation et proposer une interprétation jointe.

La campagne principale de mesures sera effectuée au printemps 2024 en initiation des stages de Master financés par le projet. L'analyse des données sera effectuée dans la continuité de l'acquisition et jusqu'à l'été 2024. Cependant, une **acquisition sismique préliminaire** de quelques jours à l'automne 2023 sera effectuée sur le site avec une demi-douzaine de nodes pour estimer la qualité et la variabilité des signaux sismiques engendrés par le dégazage de la mofette. Cette acquisition, financée par le projet MACIV, se fera lors d'une mission d'installation de stations sismiques dans la région pour le projet MACIV et permettra de dérisquer le volet sismique du projet MOFETTE_LAB.

Résultats attendus

Les livrables du projet seront :

- Une caractérisation statique géophysique haute résolution de la structure du réseau de conduits du gaz (modèle 3D de vitesses sismiques, 2D/3D de résistivité)
- Une caractérisation dynamique (4D) des propriétés mécaniques et électriques de la subsurface en réponse aux variations de flux et de concentration de gaz (à possiblement découpler des forçages environnementaux)
- Des cartographies cinématiques multi-profondeur de la résistivité électrique
- Une localisation des sources de "tremor" dues à l'infiltration du gaz dans les anfractuosités
- Des cartes spatialisées de flux et concentrations de gaz
- Des séries temporelles de flux et concentration de gaz

- Des séries temporelles de paramètres géochimiques des eaux
- Une modélisation des indices de saturation des espèces minérales
- Un modèle reliant les flux de gaz avec leur origine (crustal et / ou mantellique)

Contribution aux axes thématiques du LabEx en lien avec l'habitabilité

Notre projet se trouve à l'interface des axes thématiques A3 et A4 du LabEx en lien avec l'habitabilité. D'une part, il contribuera au thème A3 en proposant de **nouvelles méthodes multi- et transdisciplinaires** pour l'exploration et l'exploitation de futures sources d'énergie propre pour la transition énergétique. Et d'autre part, il contribuera au thème A4 en participant à l'évaluation de plusieurs types de risques naturels dans la région des volcans d'Auvergne mais aussi au niveau global :

1. comprendre l'état d'activité des volcans les plus récents et de leur potentiel de réactivation
2. étudier les émissions de gaz dans une zone non urbaine pour fournir des informations complémentaires qui serviront à l'extrapolation à des structures similaires dans des zones urbaines, où l'occurrence de tels rejets de gaz, et leur danger potentiel, peuvent être plus difficile à évaluer
3. mieux quantifier la contribution des rejets naturels de CO₂ au réchauffement climatique.

Pour tous les projets : il est requis que, le cas échéant, les contributions aux **critères secondaires** soient explicitement décrites.

B. La contribution aux objectifs structurels : il est requis de détailler la contribution aux différents objectifs structurels (voir description plus haut) [Maximum 0.5 page]

Ce projet participera à renforcer l'implication de ISTerre, et de l'OSUG en général, dans les Infrastructures de Recherche (Objectif O1) grâce à l'acquisition de données sismologiques qui seront mises à la disposition de la communauté scientifique à travers le portail RESIF, partenaire d'EPOS (Objectif O3). Ces larges volumes de données géophysiques et géochimiques pourront être intégrés au sein de Data-Terra pour contribuer à sa mission de partage, d'analyse et de combinaison de données multi-sources. Enfin, le projet viendra abonder les bases de données du RÉGEF et définira de nouveaux ponts analytiques et méthodologiques en France (Objectif O2).

C. L'effet levier pour la communauté OSUG : par exemple, co-financement acquis ou potentiel ; retombées locales en termes des financements ou recrutements [Maximum 0.5 page]

Si ce projet est financé, il sera mis en avant comme **cofinancement du projet ANR MACIV** piloté par ISTerre. Le projet MACIV est un projet ambitieux de 830k€ visant à imager par méthodes sismiques multi-échelles la structure du Massif Central pour mieux comprendre le volcanisme intraplaque de la région et le lien entre les structures héritées de la chaîne Varisque, l'orogénie Alpine et l'emplacement des différents centres de volcanisme. Le volet imagerie sismique du projet MOFETTE_LAB constitue le dernier échelon du réseau multi-échelle déployé par MACIV.

Par ailleurs, l'imagerie crustale et lithosphérique ainsi que la caractérisation du potentiel de réactivation des zones volcaniques supposées endormies ou éteintes est au cœur du projet de recherche du porteur du présent projet (A. Mordret) pour sa candidature à différents postes

permanents (CNAP, CNRS). Le succès du financement de ce projet serait un atout très clair en vue de son recrutement à ISTerre.

- D. Le renforcement de la communauté OSUG via la mutualisation dans le périmètre OSUG :** par exemple, mutualisation entre plusieurs unités de la fédération OSUG ; contribution à une plateforme ou un groupe de travail mutualisé [Maximum 0.5 page]

Le caractère fortement multi-, inter- et transdisciplinaire de ce projet permettra de développer et renforcer les capacités et les expertises analytiques de nos équipes avec pour objectif à long-terme la création d'un **groupe de travail local transdisciplinaire sur l'étude des dégazages géogènes** (Objectif O2, O3).

- E. Renforcement de la transversalité via la collaboration des équipes dans plusieurs laboratoires :** par exemple, implication de plusieurs unités (à préciser, ainsi que le nombre de participants dans chacune des unités impliquées) ; mise en place d'un service commun ou partagé [Maximum 0.5 page]

Ce projet permettra la collaboration de différentes équipes du laboratoire ISTerre qui n'ont pas l'habitude de travailler ensemble (Ondes et Structures, Minéralogie, Géochimie et Mécanique des failles), renforçant ainsi les interactions au sein de l'unité.

- F. Renforcement de l'interdisciplinarité :** implications des disciplines (à préciser), renforcement de la multi-, inter- ou transdisciplinarité [Maximum 0.5 page]

Ce projet présente un fort degré d'interdisciplinarité avec des apports de la sismologie, des méthodes géophysiques de subsurface (Electrique et EM) couplés aux mesures et analyses de gaz in situ, à la géochimie de ces gaz et des eaux de subsurface. A terme, la compilation de ces résultats fournira des modèles utiles pour la compréhension des phénomènes de volcanisme dormant.

- G. Renforcement de la dynamique du site grenoblois via l'implication des partenaires hors OSUG (scientifiques, académiques, socio-économiques, ...).** Cette implication peut concerner la coopération dans les domaines scientifiques, mais aussi des actions de formation, d'enseignement et/ou de valorisation vers différents publics cibles.

Le projet MOFFETTE_LAB, en tant que partie intégrante du projet ANR MACIV, participera à renforcer les liens de collaboration scientifique entre tous les partenaires du projet MACIV (Laboratoire Magma et Volcans de Clermont-Ferrand, le GET et l'IRAP à Toulouse et l'ITES à Strasbourg). De la même façon, MOFFETTE_LAB et MACIV feront de ISTerre et l'OSUG des interlocuteurs importants auprès des structures valorisant le Massif Central, et les volcans d'Auvergne en particulier (Vulcania, l'UNESCO, etc.), pour leur permettre une meilleure diffusion des connaissances et des résultats des recherches de pointes effectuées sur ces sites. Au-delà des frontières françaises, MACIV et MOFFETTE_LAB feront partie d'un ensemble de projets de recherche à l'échelle Européenne s'intéressant au fonctionnement du volcanisme cénozoïque intraplaque européen. Des initiatives sont en cours en Allemagne autour des volcans de l'Eifel (collaborations en cours avec Torsten Dahm, GFZ) ainsi que dans la région volcanique de la Garroxa en Espagne (soumission de projet en cours avec Jordi Diaz, Geosciences Barcelona, CSIC).

Personnel impliqué

Personnel impliqué et pourcentage de temps consacré au projet :

Nom, prénom	Laboratoire	Corps	Fonction dans le projet	% de temps
Mordret, Aurélien	ISTerre	CDI chantier	Coordination, Analyses sismologie passive - Interprétations	15
Truche, Laurent	ISTerre	Pr	Echantillonnage CO ₂	10
Gautheron, Cécile	ISTerre	Pr	Échantillonnage gaz rares	10
Moreira, Manuel	ISTO	Pr	Échantillonnage et analyse gaz rares	10
Tisserand, Delphine	ISTerre	IR	Échantillonnage, analyses géochimiques eaux modélisation PhreeqC, analyse anions	10
Garambois, Stéphane	ISTerre	Pr	Imageries et suivi temporel EM, ERT et sismique - Interprétation	10
Donzé, Frédéric	ISTerre	Pr	Imageries et suivi temporel EM	10
Voisin, Christophe	ISTerre	DR	Atténuation sismique	10

Budget du projet

Rappel :

1. Les projets standards

Budget entre 8 k€ HT (minimum) et 40 k€ HT (maximum).

Ce type de projet vise à soutenir la dynamique scientifique de la communauté OSUG.

- Mission terrain : 17640€ = ticket modérateur Sismob pour 84 nodes sismiques pour 30 jours (2€ par jour et par node) + 4 personnes sur le terrain pour 3x4 jours avec un perdiem de 125€, location de 2 véhicule + essence + péages à 150€ par jour et par véhicule
- Ticket modérateur/location matériel géophysique GProge : 3000 €
- Analyse isotopique gaz rares ponctuel (300€/ech x 15 éch) : 4500 €
- Prélèvements et analyses Géochimiques eaux : 2100 €
- Gratifications de stages de M2 : 3x3900 € = 11700 €

Budget du projet et montants demandés en € (HT) au LabEx OSUG : 35 940 €

Attention ! les modalités de financements diffèrent selon le type de projet (cf lettre de cadrage).

Nature de la dépense	Type de projet éligible	Montant	Montant demandé au LabEx
<p>Fonctionnement (dont missions, hors besoins récurrents)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mission de terrain géophysique (tickets modérateur, assurance, location véhicules, per diem, consommables véhicules) <ul style="list-style-type: none"> - Ticket modérateur Sismob 84 nodes pour 30 j à 2€/j/node - Perdiem (125€/pers/j) : 4 personnes, 3x4j - Véhicules (location + essence + péage : 150€/j/véhicule) = 2 véhicules pour 3x4j - Location matériel géophysique <p><u>Sous-total Géophysique</u></p> ▪ Analyses géochimiques des gaz (15 échantillons) <p><u>Sous-total Géochimie des gaz</u></p> ▪ Analyses géochimiques des eaux (20 échantillons, 2 sites) <ul style="list-style-type: none"> - Réactifs analyses in-situ (électrodes redox, pH ΣH₂S, Fe²⁺...) - Cotisation laboratoire - Cations majeurs/traces ICP-AES - Espèces carbonées (TOC) - Anions (10€/analyses) - Consommables (filtres, flacons, réactifs, étalons) <p><u>Sous-total Analyses géochimiques des eaux</u></p> 	Tous projets	<p>5040€</p> <p>6000€</p> <p>3600€</p> <p>3000€</p> <p><u>17640 €</u></p> <p>4500€</p> <p><u>4500€</u></p> <p>500€</p> <p>100€</p> <p>400€</p> <p>200€</p> <p>400€</p> <p>500€</p> <p><u>2100€</u></p>	<p>17640 €</p> <p>4500 €</p> <p>2100 €</p>
<p>Gratifications de stages (un stage par permanent impliqué)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stagiaire 1 (Interférométrie sismique) ▪ Stagiaire 2 (Géophysique EM, ERT) ▪ Stagiaire 3 (Echantillonnage, analyse des gaz) 	Tous projets	<p>3900 €</p> <p>3900 €</p> <p>3900 €</p>	<p>11700 €</p>
TOTAL			35 940 €

Notes :

- **Montants** : en € (HT) et pas en k€
- **Nature de la dépense** : soyez précis. Ne pas demander de frais de gestion par le laboratoire.
- **Équipement** : des devis sont à joindre en Annexe pour tout montant supérieur à 10 000 €.
- **Gratifications de stages** : éligibles dans la limite d'un stage par chercheur. À détailler en Annexe

*Durée de 1 à 3 mois ; 1 ou 2 périodes ; frais des missions sur la base des taux applicables soit 125 € par jour.

Cofinancements éventuels :

Organisme co-financeur	Nature de la dépense (Fonctionnement, équipement, missions, stage, CDD)	Montant en €	Statut (demandé/acquis)
ANR	Fonctionnement, équipement, missions, CDD	828 372€	acquis
TOTAL		828 372 €	

Aurélien Mordret - CDI chantier à ISTerre, UGA

Education

- March 2011 - March 2014 **PhD in Seismology from IPGP, Sorbonne Paris Cité**
Thesis title: "Using ambient noise correlations within a dense industrial seismic network framework: application to the Valhall network". Advisor: Nikolai M. Shapiro
- September 2006 - December 2010 **Engineer in Geophysics & Master at EOST, Strasbourg University**

Professional Experiences

- 2020 – now **CDI chantier à ISTerre** *Scientific production: 13 papers*
- Environmental seismology.
- Development and applications with DAS data for imaging and monitoring the subsurface
- 2019 – 2020 **Postdoc at ISTerre** *Scientific production: 7 papers*
- Continuous monitoring of active fault zones within the ERC FaultScan project.
- Studying source processes of intermediate-size earthquakes using stereometry.
- 2017 – now **Co-founder & consultant for Sisprobe SAS**
- 2014 – 2019 **Postdoc at Massachusetts Institute of Technology** *Scientific production: 18 papers*
- Cryo-seismology using ambient seismic noise.
- Ambient noise tomography in diverse contexts.
- 2011 – 2014 **PhD at Institut de Physique du Globe de Paris** *Scientific production: 6 papers*
- Passive imaging of the near-surface beneath the Valhall network.
- 4D time-lapse tomography to observe production-induced effects in the near-surface.
- 2008 – 2009 **Research assistant at GNS Science, Taupo, New-Zealand**

Research Interests

Ambient noise surface wave tomography

- Surface wave tomography to characterize the ground structure from near-surface to lithospheric scale. Specific applications volcanic structures.
- Developing innovative imaging techniques with dense seismic networks.

Monitoring of fault zones for seismic source characterization

- Continuous ambient noise monitoring of San Jacinto Fault
- Stereometry on intermediate size-earthquakes.
- Investigating glaciers stick-slip motion as a proxy for earthquake cycle.

Environmental seismology

- Monitoring seismic velocity changes induced by hydrogeological processes.
- Investigating glacier bed structure using passive seismic methods.

Publications

Website: <https://sites.google.com/site/aureliemordretswebpage/peer-reviewed-journals>
44 papers in peer-reviewed international journals, 1473 citations, h-index = 20 ([Google Scholar](#))
More than 70 abstracts in international conferences and workshops

Documents annexes à transmettre :

Sujets de Stage dans le cadre du projet MOFETTE-LAB

Sujet 1

Etudiant Visé : Master 2 ou Ecole d'Ingénieur 5^{ème} année avec profil Géophysique et traitement de données (4 à 6 mois)

Encadrants : Frédéric Donzé (ISTerre) et Stéphane Garambois (ISTerre)

Sujet : Traitement et interprétation de données électromagnétiques et électriques acquises au sein d'une zone volcanique avec dégazages géogènes

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet interdisciplinaire géophysique et géochimique d'étude et de surveillance d'un système superficiel de dégazage engendrant la mofette de l'Escarot (Auvergne). Le stage s'intéressera aux données électromagnétiques diffusives qui seront acquises plusieurs fois au cours de l'été 2023 suivant des cartographies multi-offset (10, 20 & 40) et multi-fréquences effectuées avec un conductivimètre de type CMD-DUO. Il permettra d'une part l'obtention de cartes avec des sensibilités à différentes profondeurs, puis à l'inversion 1D de la grille interpolée afin d'obtenir une image 3D de résistivité électrique. Ces données seront comparées à des profils de tomographie électrique enregistrés selon 2 profils perpendiculaires permettant une forte résolution en 2D après inversion. Les variations au cours du temps (au moins 3 acquisitions pendant un mois) seront alors comparées aux autres observables environnementales (météo, niveau piézométrique), géochimiques et sismiques. Le stage inclue si possible les acquisitions de terrain.

Sujet 2

Etudiant Visé : Master 2 ou Ecole d'Ingénieur 5^{ème} année avec profil Géophysique et traitement de données (4 à 6 mois)

Encadrants : Stéphane Garambois (ISTerre) et Aurélien Mordret (ISTerre)

Sujet : Traitement et interprétation de données sismologiques denses acquises au sein d'une zone volcanique avec dégazages géogènes

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet interdisciplinaire géophysique et géochimique d'étude et de surveillance d'un système superficiel de dégazage engendrant la mofette de l'Escarot (Auvergne). Le projet de ce stage sera d'analyser les données sismologiques acquises en continu pendant 1 mois par 100 capteurs 3-composantes autour de la zone de dégazage. Un ou plusieurs aspects pourront être explorés : 1) la localisation par matched-field processing des sources des potentiels tremors liés au dégazage, 2) une tomographie par corrélation de bruit sismique du site de la mofette, ou 3) la mesure et la surveillance des variations de vitesses sismiques dans la zone. Les résultats statiques ou les variations au cours du temps seront alors comparées aux autres observables environnementales (météo, niveau piézométrique), géochimiques et géophysiques. Le stage inclue si possible les acquisitions de terrain.

Sujet 3

Etudiant Visé : Master 2

Encadrants : L. Truche, F-V. Donze, D. Tisserand et C. Gautheron

Sujet : Cartographie des gaz du sol (H₂, CO₂, CH₄, Radon, He) autour de la Mofette de l'Escarot

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet interdisciplinaire géophysique et géochimique d'étude et de surveillance d'un système superficiel de dégazage engendrant la mofette de l'Escarot (Auvergne). Nous nous proposons d'analyser la composition des gaz du sol (H₂, CO₂, CH₄, Radon, He) suivant un maillage resserré autour des zones d'émergences de CO₂, et de proposer une cartographie des anomalies en CO₂ et gaz accompagnateurs. Cette campagne d'analyse sera répétée 3 fois en l'espace de 3 mois afin d'identifier d'éventuelles variations temporelles. Ces données seront accompagnées de levés électromagnétiques et comparées aux mesures géophysiques. Une attention particulière sera portée aux isotopes de l'hélium (3He/4He) comme traceur de source de l'He et par extension du CO₂ associé.

Références

- Allard, P., Carbonnelle, J., Dajlevic, D., Bronec, J. L., Morel, P., Robe, M. C., ... & Zettwoog, P. (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351(6325), 387-391.
- Battani, A., Deville, E., Faure, J.-L., Jeandel, E., Noirez, S., Tocqué, E., Benoît, Y., Schmitz, J., Parlouar, D., Sarda, P., Gal, F., Le Pierres, K., Brach, M., Braibant, G., Beny, G., Pokryszka, Z., Charmoille, A., Bentivegna, G., Pironon, J., de Donato, P., Garnier, C., Caiteau, C., Barrès, O., Radilla, G. and Baeur, A. (2010) Geochemical Study of Natural CO₂ Emissions in the French Massif Central: How to Predict Origin, Processes and Evolution of CO₂ Leakage. *Oil Gas Science and Technology - Rev. IFP* 4, 615-633.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S. and Strauch, G. (2013) Indications for the existence of different magmatic reservoirs beneath the Eifel area (Germany): a multi-isotope (C, N, He, Ne, Ar) approach. *Chem. Geol.* 356, 193-208.
- Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S., & Wetzel, H. U. (2017). Regional distribution pattern of carbon and helium isotopes from different volcanic fields in the French Massif Central: Evidence for active mantle degassing and water transport. *Chemical Geology*, 469, 4-18.
- Brenguier, F., Shapiro, N. M., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., & Nercessian, A. (2008). Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise. *Nature Geoscience*, 1(2), 126-130.
- Bussert, R., Kämpf, H., Flechsig, C., Hesse, K., Nickschick, T., Liu, Q., ... & Alawi, M. (2017). Drilling into an active mofette: pilot-hole study of the impact of CO₂-rich mantle-derived fluids on the geo-bio interaction in the western Eger Rift (Czech Republic). *Scientific Drilling*, 23, 13-27.
- Dunai, T.J. and Porcelli, D. (2002) Storage and transport of noble gases in the subcontinental lithosphere, in: D. Porcelli, C.J.B., R. Wieler (Ed.), *Noble gases in Geochemistry and Cosmochemistry. Reviews in Mineralogy and geochemistry*.
- Gadalia A. et Gal F., avec la collaboration de Rouzaire D. (†), Braibant G., Jouin F., Brach M., et Audoin N. (2010) – Métrologie des fluides de la zone Pavin-Montchal-Montcineyre. Rapport final, BRGM/RP-58129-FR.
- Gal, F., & Gadalia, A. (2011). Soil gas measurements around the most recent volcanic system of metropolitan France (Lake Pavin, Massif Central). *Comptes Rendus Geoscience*, 343(1), 43-54.

- Gal, F., Leconte, S., & Gadalia, A. (2018a). The “Escarot” gas seep, French Massif Central: CO₂ discharge from a quiescent volcanic system—characterization and quantification of gas emissions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 353, 68-82.
- Gal, F., Kloppmann, W., Proust, E., & Humez, P. (2018b). Gas concentration and flow rate measurements as part of methane baseline assessment: case of the Fontaine Ardente gas seep, Isère, France. *Applied Geochemistry*, 95, 158-171.
- **Garambois**, S., Voisin, C., Romero Guzman, M. A., Brito, D., Guillier, B., & Réfloch, A. (2019). Analysis of ballistic waves in seismic noise monitoring of water table variations in a water field site: added value from numerical modelling to data understanding. *Geophysical Journal International*, 219(3), 1636-1647.
- **Gautheron**, C.E., **Moreira**, M. and Allègre, C.J. (2005) He, Ne and Ar composition of the European lithospheric mantle. *Chem. Geol.* 217, 97-112.
- Gradon, C., Moreau, L., Roux, P., & Ben-Zion, Y. (2019). Analysis of surface and seismic sources in dense array data with match field processing and Markov chain Monte Carlo sampling. *Geophysical Journal International*, 218(2), 1044-1056.
- Kämpf, H., Bräuer, K., Schumann, J., Hahne, K., & Strauch, G. (2013). CO₂ discharge in an active, non-volcanic continental rift area (Czech Republic): characterisation ($\delta^{13}\text{C}$, 3He/4He) and quantification of diffuse and vent CO₂ emissions. *Chemical Geology*, 339, 71-83.
- Kremer, T. ; Mouquet, P. ; Kazantsev, A. ; Grauls, A. and **Voisin, C.** (2022). Monitoring geological gas storage sites with ambient noise interferometric methods: focus on seismic attenuation changes for gas movement detection. (November 10, 2022). Proceedings of the 16th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-16) 23-24 Oct 2022.
- Krüger, M., Jones, D., Frerichs, J., Oppermann, B. I., West, J., Coombs, P., ... & Möller, I. (2011). Effects of elevated CO₂ concentrations on the vegetation and microbial populations at a terrestrial CO₂ vent at Laacher See, Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(4), 1093-1098.
- Lefeuvre, N., **Truche**, L., **Donzé**, F.V., Ducoux, M., Barré, G., Fakoury, R.A., Calassou, S. and Gaucher, E.C., 2021. Native H₂ exploration in the western Pyrenean foothills. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(8), p.e2021GC009917.
- Merle, O., & Michon, L. (2001). The formation of the West European Rift; a new model as exemplified by the Massif Central area. *Bulletin de la Société géologique de France*, 172(2), 213-221.
- **Mordret**, A., Landès, M., Shapiro, N. M., Singh, S. C., Roux, P., & Barkved, O. I. (2013). Near-surface study at the Valhall oil field from ambient noise surface wave tomography. *Geophysical Journal International*, 193(3), 1627-1643.
- **Mordret**, A., Landès, M., Shapiro, N. M., Singh, S. C., & Roux, P. (2014). Ambient noise surface wave tomography to determine the shallow shear velocity structure at Valhall: depth inversion with a Neighborhood Algorithm. *Geophysical Journal International*, 198(3), 1514-1525.
- **Mordret**, A., Courbis, R., Brenguier, F., Chmiel, M., **Garambois**, S., Mao, S., ... & Hollis, D. (2020). Noise-based ballistic wave passive seismic monitoring—Part 2: surface waves. *Geophysical Journal International*, 221(1), 692-705.
- Mörner, N. A., & Etiope, G. (2002). Carbon degassing from the lithosphere. *Global and Planetary Change*, 33(1-2), 185-203.
- Seydoux, L., Balestrieri, R., Poli, P., Hoop, M. D., Campillo, M., & Baraniuk, R. (2020). Clustering earthquake signals and background noises in continuous seismic data with unsupervised deep learning. *Nature communications*, 11(1), 1-12.
- Zmazek, B., F. Italiano, M. Zivcic, J. Vaupotic, I. Kopal and G. Martinelli (2002). Geochemical monitoring of thermal waters in Slovenia; relationships to seismic activity. 57: 919-919-930.