

*Lettre d'intention pour un chantier*

**RGF « Massif Central français »**

**Formation-différenciation-évolution du continent Ouest Européen :  
géo-ressources, climat et aménagement du territoire**

**Projet soutenu par des chercheurs des laboratoires :** Géosciences Environnement Toulouse, Géosciences Rennes, Laboratoire Magmas et Volcans Clermont-Ferrand et Saint Etienne, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, CEREGE Marseille, Laboratoire de Géologie de Lyon, Georessources Nancy, Géosciences Montpellier, Géosciences Marines et Géomorphologie du Littoral Brest, Géoazur Nice, Géosciences Paris Sud, Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes et du Mans, TRACES Toulouse, BRGM, ...

## **1. Introduction : Défis des géosciences et enjeux sociétaux d'un chantier RGF Massif Central français**

Dans le paysage géologique et géographique français, le Massif Central français (MCF) occupe une position stratégique. Il a enregistré une histoire géologique variée depuis la fin du Protérozoïque jusqu'à l'Actuel, soit près de 600 Ma. Le MCF représente tout d'abord une des plus vastes zones d'affleurement du socle varisque d'Europe occidentale et constitue donc un objet incontournable pour caractériser-comprendre (i) la croissance de la croûte continentale à la transition Protérozoïque-Phanérozoïque et la constitution du stock de ressources minérales associé, et (ii) la différenciation de la croûte et le développement de systèmes minéralisés lors de l'orogénèse varisque. Ensuite, le MCF, en tant qu'objet géologique et géographique, a enregistré l'effondrement de la chaîne varisque associé au développement d'une pénéplaine fini-Paléozoïque puis toute l'histoire géodynamique mésozoïque-cénozoïque dans le cadre de la dislocation de la Pangée et du cycle alpin marqués par (i) le soulèvement-démantèlement de plusieurs surfaces d'aplanissement altérées témoignant des interactions entre dynamique du manteau profond et de la lithosphère avec les variations du niveau marin, (ii) l'ouverture de rifts à l'Eocène supérieur et (iii) la mise en place d'un volcanisme depuis le Miocène dont les manifestations les plus récentes datent de quelques milliers d'années. La compréhension de cette activité mésozoïque-cénozoïque a des implications en termes de remobilisation des ressources minérales, de développement des formes du relief et des sols, de risque sismique, de ressources géothermiques, de ressources en eau, et d'occupation du territoire dont les 1ères traces sont identifiées au Pliocène supérieur, il y a plus de 2 Ma. Enfin, le MCF recèle potentiellement un enregistrement de processus ayant un fort impact sur le cycle du carbone et le climat comme la formation des ceintures orogéniques, le développement de profils d'altération, le dépôt de plateformes carbonatées et le volcanisme.

Depuis l'établissement de la 1<sup>ère</sup> carte géologique de France par Dufrenoy et de Beaumont en 1841, l'étude du MCF a fait l'objet de plusieurs campagnes de cartographie et d'inventaire minier notamment par le BRGM ou dans le cadre du programme GéoFrance 3D il y a près de 20 ans et également plus récemment de projets ponctuels financés par le CNRS (~10 projets INSU ces dernières années) ou l'ANR (ANR Varpeg). Ces programmes ont permis de constituer une base de données riche mais hétérogène et de faire émerger des questions scientifiques originales d'intérêt général. La connaissance de la géologie du MCF est néanmoins lacunaire et sa compréhension requiert une harmonisation des cartes géologiques et des bases de données stratigraphiques (notamment sur les formations superficielles et le régolithe), structurales, géochimiques, géochronologiques, géologiques, géomorphologiques et hydrologiques. La couverture géophysique est également parcellaire, la structure du MCF n'ayant été abordée dans son ensemble qu'au cours des années 70 au travers de profils de sismique réflexion et un levé aéromagnétique de moyenne résolution du domaine volcanique. Le programme GéoFrance 3D a permis d'obtenir par sismologie les premières images lithosphériques de la partie nord du massif et d'entrevoir le rôle majeur du Sillon Houiller. Dans le Limousin il a apporté des contraintes sur la métallogénie du MCF en relation avec la structure crustale, imagée par deux profils de sismique réflexion profonde combinés à de la gravimétrie. Ces premières données géophysiques ont montré que le MCF est un objet géologique de premier ordre qui mériterait un grand programme d'imagerie géophysique pour compléter la cartographie de surface et contraindre sa structure crustale et lithosphérique. Ainsi, le MCF constitue un chantier fédérateur idéal dans le cadre du RGF couvrant l'ensemble des disciplines des Géosciences et permettant d'aborder des thèmes scientifiques majeurs avec des implications sociétales de 1<sup>er</sup> ordre.

## **2. Questions scientifiques majeures**

### **2.1. Socle varisque du MCF : témoin de la croissance et de la différenciation de la croûte Ouest Européenne**

#### **Croissance de la croûte et constitution d'un stock de ressources minérales**

La croissance de la croûte continentale par extraction de magmas issus du manteau et/ou issus du panneau plongeant en subduction est associée à la constitution d'un stock initial de ressources minérales. La contribution relative et le contexte de pétrogenèse de la croûte est un sujet de débat actif et une meilleure connaissance de la nature des magmas juvéniles à l'origine de la formation de la croûte pré-varisque puis des magmas ajoutés à la croûte au cours du Paléozoïque en lien avec l'ouverture de rifts à l'Ordovicien puis au Dévonien et enfin au cours de l'effondrement gravitaire à la transition Carbonifère-Permien apporterait un jalon déterminant pour avancer sur cette question. A noter que les reconstructions paléogéographiques pour la période pré-varisque issues des données paléobotaniques sont compatibles avec des bassins océaniques de taille limitée alors que les données paléomagnétiques

suggèrent un océan de plus de 1000 km de large. Ainsi, la nature et le nombre des blocs continentaux, des domaines océaniques et la nature des marges pré-varisques restent à préciser.

### **Construction-évolution-effondrement de la ceinture orogénique Varisque**

La ceinture orogénique varisque s'étend de l'Asie à l'Amérique du Sud et, en comparaison avec l'Ibérie, les Vosges, la Forêt Noire, ou la Bohême, la connaissance du socle varisque du MCF est très rudimentaire. Pourtant, le MCF présente un cas d'étude représentatif de cette ceinture caractérisée par (i) une zone interne ayant préservé un complexe de nappes avec des roches crustales et des roches ultramafiques dont les conditions métamorphiques témoignent de gradients de HP/BT jusqu'à HT/BP et (ii) une zone externe avec des dépôts de sédiments continentaux syn- à post-orogéniques Carbonifère-Permien. Néanmoins, la géométrie des zones de subduction et la dynamique de l'enfouissement-exhumation des roches métamorphiques sont débattues ainsi que les modalités de l'accrétion tectonique-magmatique de la ceinture orogénique. Par ailleurs, l'évolution topographique de la chaîne est méconnue. Un épaississement crustal d'au moins 45 km d'après les données thermobarométriques des roches métamorphiques implique, en condition d'équilibre isostatique, un relief entre 3000 et 4000 m au Carbonifère supérieur en accord avec les rares données paléo-environnementales. L'effondrement de la chaîne intervient en quelques Ma comme en témoigne la présence, sous les dépôts du Mésozoïque, des bassins du Stéphano-Permien discordants sur les roches cristallines exhumées. De nombreuses données sont disponibles du fait de l'intérêt économique des ressources charbonnières de ces bassins et l'étude détaillée de quelques exemples (St Affrique, Graissessac, Saint Etienne) a servi de base pour l'élaboration d'un modèle de formation de ces bassins d'effondrement en contexte d'extension tardi-orogénique par analogie avec l'extension du plateau du Tibet et des Basin and Range de l'Ouest de l'Amérique du Nord. Ces études mettent également en évidence le rôle clé du Sillon Houiller qui contrôle la distribution des bassins mais dont la nature et l'échelle (crustale et/ou lithosphérique) sont débattus.

Ces caractéristiques du socle varisque mettent en exergue des questions fondamentales concernant la construction, la différenciation et la destruction des ceintures orogéniques en lien avec les processus profonds et de surface, notamment l'évolution thermomécanique de la racine orogénique et les couplages géodynamique/relief/érosion, avec des implications sur l'évolution du climat au cours du Paléozoïque et sur la distribution des ressources minérales (métaux précieux Au, métaux de base Cu-Pb-Zn, Sn-W, Terres Rares Li-Ta-Be, F et Ba, charbon) liée aux transferts magmatiques, hydrothermaux ou encore par érosion-sédimentation.

### **2.2. Surfaces d'aplanissements et séries méso-cénozoïques du MCF : dynamique mantellique et climat de la dislocation de la Pangée à l'orogénèse alpine**

Le socle varisque du MCF est recouvert en discordance par des séries méso-cénozoïques qui ont enregistré de par leur structuration et leur composition, les différents épisodes de soulèvement et de démantèlement du socle varisque. Ces séries sont donc à même de documenter l'histoire tectonique et les changements climatiques post-varisque avec des implications en termes de remobilisation des systèmes minéralisés lors de la dislocation d'un supercontinent et d'une reconfiguration des circulations océaniques.

#### **Circulations océaniques, changements climatiques et mouvements verticaux lors de la dislocation de la Pangée**

Le dépôt de séries de plateforme au cours du Mésozoïque témoigne des circulations océaniques et des changements climatiques au cours de cette période marquée également par les ouvertures combinées des océans Atlantique et Téthys lors de la dislocation de la Pangée. Ces séries, affleurant en continuité dans le Quercy, sur la bordure ouest des Grandes Causses et dans le détroit de Rodez, offrent un enregistrement unique de ces processus. Durant cette période le MCF se situait à l'articulation des influences de ces 2 océans et son rôle de contrôle sur les échanges d'eau reste à démontrer. Le MCF est exhumé et altéré à la fin du Jurassique comme le montrent les cuirasses latéritiques datées par paléomagnétisme. Les questions débattues concernent principalement (i) l'épaisseur de sédiments jurassiques, puis crétacés déposés et érodés, (ii) les différentes phases d'altération et leurs profils latéritiques associés (du Trias au Miocène moyen) et (iii) la cause des mouvements verticaux ainsi enregistrés (et notamment les déformations apto-albiennes – 120 Ma).

#### **Rifts cénozoïques, soulèvement et dynamique mantellique dans l'avant pays alpin**

L'histoire cénozoïque du MCF est également marquée par l'ouverture des fossés d'effondrement des Limagnes, de Roanne et du Forez qui font partie du Système de Rift Ouest Européen étendu de la Bohême à la mer Méditerranée. Le remplissage de ces bassins de l'Eocène supérieur au Pliocène comprend des dépôts continentaux, lacustres, fluviaux et des dépôts marins peu profonds (saumâtres et évaporitiques). L'ouverture de ces fossés est contemporaine à la collision continentale dans l'ouest des Alpes bien enregistrée par la migration des bassins flexuraux vers le NW et est suivie par une activité volcanique au Miocène. Ainsi les différentes hypothèses proposées pour expliquer ces ouvertures sont (1) un point chaud, (2) une extension dans la plaque européenne liée à la subduction alpine (slab-pull) et (3) une transtension liée au décrochement induit par le mouvement différentiel entre Ibérie et Eurasie à la transition entre Pyrénées et Alpes. Dans le même temps, de nombreux bassins sont préservés le long du Sillon Houiller dont la dynamique d'ouverture est inconnue. La paléogéographie du MCF à l'Eocène-Oligocène i.e. avant le soulèvement miocène lié au volcanisme reste à être précisée. En complément, la structure des séries cénozoïques est à même de renseigner sur les mouvements verticaux, l'érosion et les transferts sédimentaires, le développement des rifts tertiaires et l'évolution des bassins sédimentaires périphériques via une approche « source-to-sink ». Cette anomalie topographique à grande longueur d'onde pose la question des relations entre relief et dynamique du manteau asthénosphérique et lithosphérique et plus spécifiquement interroge sur les processus contrôlant (1) le gradient topographique, l'asymétrie E-W des marges du Massif, et la

limite de partage entre réseaux Méditerranéen et Atlantique, (2) la réponse à l'évolution du niveau de base en lien avec la crise messinienne ou (3) les instabilités des réseaux drainant en lien avec plusieurs phases de soulèvement dont la plus récente serait Pliocène. Les enjeux en termes de connaissance et gestion des ressources hydrologiques et géothermiques de ces bassins sont majeurs.

### ***Volcanisme miocène et dynamique des systèmes magmatiques continentaux***

La formation des rifts à l'Éocène-Oligocène est suivie par une activité volcanique avec la mise en place depuis le Miocène de la Chaîne des Puys, du Sancy et du Cantal et des autres provinces volcaniques du MCF (Ardèche, Devès...). Ces ensemblesaffleurent en 3 dimensions grâce à l'érosion et l'exploitation en carrières, ce qui permet une reconstruction spatio-temporelle de la dynamique éruptive. Ces données uniques documentent les échelles de temps de l'édification des volcans monogéniques ou la dynamique de mise en place des coulées de lave les causes et apportent des informations déterminantes pour la compréhension des changements de régime au cours d'une même éruption. Le couplage des observations en surface avec des informations sur les processus en profondeur (via la pétrologie expérimentale ou les études géophysiques), fournissent des éléments sur la structure des systèmes d'alimentation magmatique (profondeurs et états des réservoirs magmatiques), la quantification du taux de production et la vitesse d'ascension des magmas, et sur les mécanismes de différenciation des magmas alcalins. Par ailleurs, se pose la question des processus impliqués dans la genèse des magmas, la nature des sources et le contexte géodynamique de la fusion. L'activité volcanique cénozoïque est à mettre en relation avec la formation des fossés des Limagnes et les transferts de sédiments associés avec pour objectif d'identifier les rôles relatifs de l'extension, de la tectonique alpine ou d'un éventuel point chaud dans la production des magmas. L'impact de ce volcanisme en termes de dégazage et donc de changement climatique est également à prendre en compte. Une meilleure connaissance de ces environnements volcaniques apporterait des éléments pour l'étude et l'exploitation des ressources géothermique, en eaux et en matériaux.

## **3. Enjeux sociaux-économiques**

### **3.1. Ressources minérales et énergétiques, matériaux et minéraux industriels**

L'approvisionnement en ressources minérales et énergétiques est un des enjeux du XXI<sup>ème</sup> siècle. Actuellement, parmi les matières minérales critiques figurent les terres rares, le tungstène, l'antimoine, les éléments du groupe du platine, le niobium, et le charbon. Le développement économique d'une région s'appuie également fortement sur l'accès aux matériaux de base servant notamment à la construction et à l'aménagement du territoire.

#### ***Histoire de l'exploitation des ressources minérales et archéologie minière***

Le MCF a été le siège d'une longue exploitation des ressources métalliques depuis la Protohistoire et l'essentiel des vestiges miniers de surface et souterrain, notamment les plus anciens, sont encore présents dans le relief et le paysage. Ils constituent un réservoir d'indices de minéralisations et d'accès directs à des fronts de taille souterrains. Leur mise en évidence et interprétation par l'archéologie minière sont des compléments indispensables à l'inventaire des ressources nationales. Ces vestiges miniers constituent aussi un patrimoine extractif à fort potentiel en termes de tourisme éducatif et culturel. Notamment les travaux de surface (Au en Limousin, Dordogne, Auvergne ; Sn en Morvan, Limousin, Cantal, Aveyron) composent un conservatoire de paysages anthropisés qui mérite d'être valorisé. Enfin, les sites miniers anciens sont des réservoirs d'études des paléo-pollutions, un observatoire du devenir des pratiques extractives de surface et souterraines sur le temps long, et de l'évolution des traces d'érosion sur versants à l'échelle humaine.

#### ***Ressources minérales et énergétiques***

Le MCF représente l'entité géologique du territoire national qui possède le plus important potentiel minier actuel et historique, avec de nombreux gisements de classe européenne à mondiale. Un regain d'intérêt par des compagnies minières pour ce territoire se traduit par des demandes de permis d'exploration. Pratiquement tous les types de gisements connus dans l'hexagone sont présents dans le MCF et il constitue une zone clé pour la compréhension des processus à l'origine d'une diversité de minéralisations. Les études métallogéniques, principalement à l'échelle des gisements, sont abondantes mais les contributions relatives du magmatisme, de l'hydrothermalisme, de la déformation, des processus de surface, qui contrôlent la localisation et la distribution des districts et gisements à l'échelle régionale restent à déterminer. La superficie très importante du MCF en fait une cible privilégiée pour comprendre ces contrôles régionaux à continentaux. De fait, le potentiel minier reste largement méconnu et l'existence de gisements économiques est très probable, notamment en métaux rares (Li-Ta-Be), en métaux critiques Sn-W, Sb, en or et en métaux de bases (Cu-Pb-Zn), ainsi qu'en F et Ba en complément des gisements déjà identifiés.

#### ***Matériaux et minéraux industriels***

Le MCF est actuellement une source importante de production de granulats pour de très grandes agglomérations périphériques (e.g : Paris, Lyon, Montpellier...), et ce rôle devrait s'amplifier dans les décennies à venir. Ce territoire est également le site de très nombreuses unités de production en roches et minéraux industriels (terre cuite, feldspaths, kaolin, silice ultrapure, ciments, etc...) en particulier pour des secteurs industriels, dont la dimension est d'ordre national, voire international. Un besoin essentiel d'acquisition et de développement de la connaissance géologique se fait ressentir pour répondre à des enjeux économiques majeurs

concernant la recherche et la valorisation (1) de substances stratégiques (ex : diatomite) car les réserves connues et disponibles s'amenuisent avec le temps, (2) de substances à potentiel important nécessitant des investissements industriels (ex : attapulgite) et/ou des prospections ciblées (ex : argiles céramiques, matériaux pouzzolaniques et cendro-ponceux), (3) de substances présentant des caractéristiques a priori intéressantes mais nécessitant d'être investiguées (ex : bentonite). Le MCF présente également un fort potentiel de redéploiement sur l'extraction/exploitation de pierres ornementales et de construction.

### **Ressources géothermiques**

Le MCF est sans doute le territoire de France qui dispose des ressources géothermiques les plus abondantes et les plus diversifiées, même si ces gisements restent mal connus et les développements économiques timides. Les paramètres favorables de cette région sont (1) une anomalie thermique (gradient géothermique jusqu'à 2 fois supérieur à la normale), liée à l'amincissement crustal et une remontée de manteau profond se traduisant par un volcanisme récent (Chaîne des Puys jusqu'à 6700 ans BP et le massif du Mont Dore – Sancy) et des systèmes hydrothermaux actifs, (2) des fractures contrôlant les circulations hydrothermales, (3) des bassins d'effondrements (Limagne) dotés de réservoirs sédimentaires profonds poreux et fracturés, et (4) un potentiel de ressources superficielles favorables au développement des applications en géothermie de très basse énergie (TBE). Concernant la géothermie de Basse (BE) Moyenne (ME) et Haute énergie (HE), le niveau de connaissance des ressources régionales est très variable, et découle pour l'essentiel de travaux menés dans les années 1970 par le BRGM, à la suite des chocs pétroliers. A l'exception de travaux soutenus par l'ADEME sur la Limagne (BE et ME) dans les années 2000 et de l'exploration conduite depuis peu sur des gisements potentiels pour la géothermie de HE, par différentes sociétés privées détentrices de permis exclusifs de recherche (PER), ces travaux menés dans les années 70 n'ont pas fait l'objet d'actualisation alors que les technologies ont considérablement évolué. Dans un contexte de transition énergétique privilégiant le recours aux énergies renouvelables, force est de constater que la géothermie est encore peu utilisée au niveau régional. Cela tient en particulier à l'insuffisance de connaissances sur les différents potentiels. Comblar cette lacune sera un enjeu majeur de ce chantier RGF dans le MCF.

### **3.2. Ressources sols et eaux**

#### **Ressources sol, zones humides et stockage du carbone**

Le stockage de carbone dans les sols est devenu un enjeu majeur dans le contexte du changement climatique. Or, le MCF est caractérisé par une très grande variabilité des couvertures pédologiques à l'échelle des paysages, conséquences à la fois de la diversité des formations géologiques et végétales mais aussi des contraintes topographiques, hydrologiques et climatiques ainsi que de l'impact des activités humaines. A l'échelle du MCF, les sols peuvent constituer un puits de carbone important qui n'est pas à ce jour quantifié, alors que l'on estime que 3 à 5% du territoire est recouvert par des zones humides reconnues comme des milieux accumulateurs de matière organique. Il apparaît donc que des travaux portant sur la quantification des stocks de carbone, la cartographie de ces ressources, la restauration et l'évolution des fonctions écologiques des zones humides sont plus que jamais nécessaires au niveau du MCF.

#### **Ressources en eau souterraines et eaux thermales**

Le MCF recèle de nombreuses ressources en eaux souterraines dans le socle anté-volcanique ainsi que dans les lithologies volcaniques. Dans ce socle anté-volcanique, ces ressources en eaux sont dues à la présence d'un horizon fissuré d'anciens profils latéritiques. Aujourd'hui, dû à une mauvaise connaissance des épaisseurs mais aussi de l'étendue spatiale de ces zones fissurées de subsurface, les acteurs de l'eau privilégient les retenues sur les rivières ou les captages de sources. Ils se retrouvent alors confrontés à des problèmes récurrents à la fois quantitatifs (étiages sévères lors de périodes de fortes demandes) mais aussi qualitatifs (vulnérabilité accrue aux pollutions accidentelles et/ou chroniques). Ainsi, le besoin d'amélioration de la connaissance géologique apparaît comme crucial au niveau des formations du régolithe. Cette connaissance passera en particulier par une caractérisation des propriétés physiques des roches pour permettre de développer une approche originale couplée entre modèles géologiques 3D et modèles hydrogéologiques performants. Les travaux réalisés dans le cadre d'un chantier RGF MCF permettraient donc de caractériser et quantifier la ressource en eau dans les formations de socle et les formations volcaniques. Une telle modalisation nécessiterait aussi de réfléchir à l'intégration dans le modèle d'une recharge des aquifères spatialisée mais aussi de proposer une méthode de régionalisation des paramètres hydrodynamiques du modèle 3D. Par ailleurs, l'altération des formations géologiques conditionne fortement à la fois la dynamique de la circulation des eaux souterraines en induisant des contrastes de perméabilités mais aussi la qualité de ces eaux. Ainsi, la signature de la diversité géologique du MCF se retrouve dans le fonctionnement hydrogéochimique des systèmes aquifères. Afin d'appréhender ce fonctionnement, il sera utile dans un premier temps de s'appuyer sur les bases de données existantes et de proposer des approches innovantes couplées entre mesures hydrogéochimiques de terrain et informations géologiques (lithologie, géochimie). En termes économiques, les ressources en eaux minérales et en eaux thermales représentent un enjeu majeur dans le territoire du MCF pour des grands groupes comme pour des entreprises familiales qui exploitent soit les eaux d'embouteillage, soit les eaux thermales. Cette thématique régionale est largement mise en avant dans les plans et schémas régionaux (par exemple pour la région Auvergne-Rhône-Alpes). Dans le cadre du RGF, il serait important d'insister sur ces circulations d'eaux particulières et de mieux contraindre la nature des processus physico-chimiques qui ont permis l'acquisition par ces eaux de leur minéralisation. Ainsi, la compréhension des mécanismes de recharge de ces aquifères, ainsi que la caractérisation de la géométrie des circulations d'eaux profondes représentent d'une part un enjeu majeur pour les industriels pour sauvegarder et développer l'emploi sur leurs sites de production mais aussi un enjeu scientifique majeur, dans un souci de préservation de la qualité et de la quantité de cette ressource en eau.

### 3.3. Risques naturels en milieux naturels et urbanisés

Le MCF est un domaine orogénique affecté par nombre de risques naturels, au premier rang desquels figurent les risques liés aux inondations (ondes de crues automnale et printanière sur les principaux cours d'eaux – Allier, Cher, Dordogne, Loire, accentuées en particulier par les événements cévenols), aux mouvements de terrain (chutes de blocs, glissements de terrains et coulées de boue), aux séismes.

#### **Instabilités du sol et du sous-sol**

Les problématiques scientifiques liées aux instabilités du sol et du sous-sol, notamment en milieux urbanisés sont nombreuses. Ces instabilités peuvent être induites par les glissements gravitaires lents et/ou rapides, l'érosion (ruissellement, etc.), les chutes de blocs et effondrements de falaises, ainsi que le retrait-gonflement des argiles, mais aussi par la présence de cavités souterraines naturelles ou anthropiques, ou encore par l'exploitation des ressources souterraines (eau, etc...). Des verrous à lever concernent la compréhension et l'analyse des mécanismes d'initiation et de propagation des instabilités nécessitent le développement (1) de méthodes de mesure in situ économiquement réalistes, d'outils de modélisation pour l'investigation et le suivi des sites instables, (2) d'outils de modélisation validés et opérationnels permettant de combiner différentes sources de données (géologie, imagerie géophysique, etc.) sur des sites pilotes à l'échelle locale, (3) de méthodes d'évaluation et de cartographie de la susceptibilité, de l'aléa et/ou du risque qui seront déployés à différentes échelles (agglomération / département / région / territoire national). Ces développements permettront de dimensionner des systèmes de surveillance à mettre en place dans les régions vulnérables. Les contextes géographiques concernés dans le MCF sont autant les zones naturelles, montagneuses à fort relief et les grands bassins versants que les milieux urbain/péri-urbain où la concentration des enjeux rend les phénomènes présentant une intensité, même faible, particulièrement coûteux pour les collectivités et les particuliers. Ces contextes géographiques correspondent à des contextes géologiques dans le MCF très variés, depuis des domaines de socle, des formations volcaniques, des formations sédimentaires et des formations du régolithe.

#### **Risque inondation**

Depuis plusieurs années, Les événements pluviométriques cévenols s'intensifient, et ont tendance à se développer de plus en plus vers le nord (aujourd'hui en Haute-Loire), et pourraient à terme impacter l'ensemble du Massif Central. Cette progression s'accompagnera inévitablement de risques accrus à la fois pour les populations mais aussi pour le développement économique. Aux phénomènes d'inondation induits par ces pluies, s'ajoutent en effet l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain, et particulièrement les grands glissements et coulées de boue associées, directement influencés dans leur stabilité par ces surplus intenses d'eau. La prévision et la quantification des risques induits par ces nouveaux processus météorologiques extrêmes nécessitent d'approfondir les connaissances sur ces aléas en intégrant modélisation hydrodynamique du transport sédimentaire couplée aux observations géologiques de terrain.

#### **Risques miniers et post-miniers**

Les risques liés aux exploitations minières sont de plusieurs ordres et leur importance dépend du type d'exploitation (souterraine ou à ciel ouvert) et de la nature de la substance exploitée. Les risques environnementaux miniers et post-miniers concernent la gestion des déchets miniers, les produits dangereux, les pollutions sols, des eaux de surface et souterraines, la stabilité des ouvrages, la santé humaine, la qualité de l'air et les écosystèmes. La compréhension de ces phénomènes est un enjeu majeur afin d'assurer une meilleure prévention des risques d'incidents et d'accidents affectant les différents compartiments environnementaux, une aide à la décision et l'optimisation de la surveillance des ouvrages. La gestion des risques liés à l'exploitation de nouvelles substances ou de recyclage d'anciens dépôts représente un nouveau champ de recherche et développement en termes de planification, d'acceptabilité sociale et de démonstration de leur faisabilité grâce à des outils d'aide à la décision à développer dans le secteur minier. Le MCF ayant été un territoire majeur pour l'exploitation minière, il est particulièrement sujet à ce type de risques.

#### **Risques liés aux émissions de CO<sub>2</sub> d'origine naturelle**

Plusieurs sites d'émanation de CO<sub>2</sub> d'origine naturelle sont connus dans le MCF. Les failles méridiennes des fossés d'effondrement du MCF, et les grandes lignes de fractures de direction cévenole (NE-SW) affectent le socle cristallin, et favorisent les remontées de CO<sub>2</sub> d'origine magmatique. Ces remontées se traduisent par des sources d'eaux minérales gazeuses, par des eaux thermales chaudes, par des émanations de gaz (associées à une production industrielle jadis jusqu'à 1 t/jour de CO<sub>2</sub> liquide). Ces dernières, parce qu'elles sont encore mal connues et donc mal appréhendées, ont été, dans le passé, sources de plusieurs décès et accidents. Une meilleure gestion de ce risque passe par une meilleure connaissance à la fois des sources de CO<sub>2</sub> magmatique, et des processus de transferts de ce gaz, et des gaz associés, à travers le régolithe jusqu'à la surface. Pour répondre à ce besoin, il sera nécessaire d'acquérir des données géologiques, et de réaliser des modélisations géologiques, couplées à des modèles d'écoulement de gaz.

#### **Risque sismique**

Le MCF est classé en zone de sismicité 1 à 3. La majorité de l'activité sismique se situe dans les massifs granitiques, largement marqués par la fracturation. Deux événements majeurs ont touché, en 1477 et 1490, avec une intensité VIII, des zones aujourd'hui largement urbanisées, dont Clermont-Ferrand. Le prédiagnostic de microzonage sismique pour la ville de Clermont-Ferrand a montré

la nécessité d'amélioration de la connaissance approfondie pour une meilleure appréhension de l'aléa régional. Pour pouvoir estimer les effets de site, il est indispensable d'avoir une bonne connaissance de la nature, de l'épaisseur et des propriétés physiques des formations superficielles dans les vallées, ainsi que de la structure de la couverture sédimentaire et du toit du socle. Ces données ne sont pas toujours disponibles dans le MCF et de nouvelles acquisitions, associées à une valorisation des données existantes, seront donc nécessaires pour alimenter les modèles de simulation tridimensionnelle de la réponse sismique des sols, en milieu géologique complexe, pour une meilleure appréhension de l'aléa régional.

### **Géologie urbaine**

Le développement urbain durable est un enjeu important qui nécessite une gestion intégrée de l'espace souterrain. Cela implique une bonne connaissance du sous-sol qui passe par l'acquisition de données géologiques et physiques quantitatives, leur gestion dans des systèmes d'information 3D et 4D et leur utilisation dans des modèles géologiques 3D. Cette approche intégrée permettra de combiner des approches applicatives (eau, matériaux, énergie, pollution, espaces...) dans un souci de stratégie prospective. Dans le MCF, cet enjeu concerne les principales agglomérations (Clermont Ferrand, le Puy en Velay, Limoges, Guéret...).

### **Risque sanitaire**

Deux éléments sont à prendre en compte sur le plan sanitaire. Tout d'abord la carte du potentiel du radon établie par l'IRSSN sur la base de la carte géologique au million met en évidence une concentration élevée en lien avec la prédominance de granites à l'affleurement. Cette carte est très approximative et s'appuie sur un classement des formations géologiques selon leur teneur mesurée ou extrapolée en uranium en tenant en compte des facteurs associés pouvant faciliter le transport du radon dans les roches. De plus, un projet de cartographie par le BRGM de l'aléa amiante environnemental est en cours dans 6 zones du MCF, et s'intéresse en particulier à l'analyse des roches basiques et ultrabasiques métamorphiques hôtes de ces minéraux asbestiformes. L'amélioration de la connaissance géologique du MCF serait un apport déterminant pour la détermination plus précise de la distribution du radon et de l'amiante avec des implications sur l'aménagement du territoire, la santé publique et l'exploitation des ressources.

### **3.4. Tourisme et patrimoine géologique**

L'attractivité touristique du MCF est en grande partie basée sur ses ressources géologiques et géomorphologiques (volcans, eaux thermales, paysages, terroirs) et archéologiques extractives (mines et carrières). Les parcs naturels sont au nombre de 10 sur le territoire du MCF : Morvan, Millevaches, Volcans d'Auvergne, Livradois-Forez, Pilat, Causses du Quercy, Grands Causses, Cévennes, Monts d'Ardèche et Haut Languedoc. Le Parc Naturel Régional des Monts d'Ardèche a acquis le statut de Géoparc Mondial de l'UNESCO en 2014 et le territoire de la Chaîne des Puys et de la Faille de Limagne est candidat à l'inscription au patrimoine mondial de l'UNESCO. Le MCF affiche une variété d'espaces naturels tels que les gorges du Tam, les paysages volcaniques, le plateau du Mont Lozère, la campagne le long du cours supérieur de l'Allier, les collines boisées de la Montagne Noire, les gorges de l'Ardèche et les grottes de l'Aven d'Ornac, auxquels pourraient s'ajouter les paysages (parcs) miniers du Limousin (Au, Sn), du Morvan (Sn, Fe, Au/Ag) ou de l'Aveyron (Sn, Ag). Ces différents sites rendent accessible au grand public la longue histoire naturelle et humaine du MCF. Grâce aux eaux thermales qui surgissent naturellement, le MCF est une place incontournable du bien-être en France, et source indéniable de développement. La gastronomie revêt aussi un écho à la géologie et au terroir, les vignes s'enracinent dans des sols au bord des rivières ou à flanc de coteaux aux caractéristiques géologiques uniques, et les fromages prennent corps et mûrissent au sein des caves naturelles ou creusées sous les maisons. L'acquisition de nouvelles connaissances géologiques et la réalisation de travaux de synthèse contribueront à la valorisation du patrimoine géologique régional. Cette valorisation passe aussi par des actions de diffusion de l'information scientifique, par l'aménagement de parcours géologiques éducatifs à destination du grand public, et par une collaboration étroite avec les collectivités locales et régionales et avec les organismes de gestion du tourisme. Le développement de ces activités pourrait mener à la création de nouveaux géoparcs mettant en valeur le patrimoine géologique et les liens entre la nature du sous-sol, des sols et le développement de la faune et de la flore intégrant l'histoire humaine (Limousin, Gorges de l'Aveyron à Najac). Face aux enjeux du changement climatique l'étude des différentes composantes de ces terroirs permettra de mieux appréhender leur évolution et les contraintes socio-économiques qui en découlent.

## **4. Chantier RGF Massif Central : De nouvelles données géologiques et géophysiques pour harmoniser la connaissance du sol et du sous-sol au cœur du territoire français**

### **4.1. Projets en cours**

Ce futur chantier RGF "Massif Central" viendra compléter et s'appuyer sur des projets fédérateurs tels que (1) le projet ANR VARPEG focalisé sur la genèse des pegmatites à métaux rares, (2) le projet ANR Pyrope ayant fourni des données sismique montrant l'empreinte du Sillon Houiller sur la structure lithosphérique sous le S du MCF et les Pyrénées, (3) le projet Total-BRGM « Source to Sink » qui a pour objectif de comprendre l'ampleur et le contexte géodynamique des déformations Jurassique terminal-Albien, contemporaines de l'ouverture de l'Atlantique Nord et de la fermeture de la Téthys, (4) le projet H2020 Deep EGS qui concerne la compréhension des systèmes géothermiques de haute énergie, et (5) le projet SISMA EDF. Il pourra s'appuyer aussi sur de

nombreux projets INSU Syster, sur le Labex voltaire, le Labex ClerVolc, et sur plusieurs projets financés par des agences de l'eau. On peut aussi anticiper un soutien fort des collectivités (départements, régions) à toutes les actions contribuant à la valorisation du patrimoine et des ressources géologiques, comme c'est le cas actuellement pour la Région Auvergne.

#### **4.2. Etat des lieux des données disponibles**

En plus des données récemment acquises et/ou en cours d'acquisition dans les projets décrits précédemment, le chantier RGF « Massif Central » pourra s'appuyer sur une grande diversité de données existantes disponibles, mais qui n'ont pas toujours fait l'objet d'une exploitation. Il s'agit en particulier (1) des cartes géologiques existantes du BRGM, à différentes échelles (depuis le million, jusqu'au 1/50 000), (2) des cartes géologiques harmonisées (à l'échelle 1/50 000) départementales, régionales, de parc naturel, (3) des données stockées dans la BSS (banque de données du sous-sol) et dans le guichet H, (4) des logs validés (projet logIso BRGM), (5) des données géophysiques parcellaires (données de sismique réflexion, levé aéromagnétique de moyenne résolution du domaine volcanique, profils de sismique réflexion profonde combinés à de la gravimétrie dans le Limousin), (6) des données issues de la BDLisa et de ADES, (7) des données Lidar précises en Auvergne, (8) de carottes de sondage et de travaux de synthèse sur le Jurassique du Quercy et des Grands-Causse.

#### **4.3. Acquisition de données nouvelles sur le terrain & importance d'un volet géophysique**

Un chantier RGF d'envergure comme celui du MCF couvre un large domaine géologique, représentant environ 20% du territoire français. La réalisation d'un tel chantier nécessitera des acquisitions de terrain importantes, avec en particulier (1) l'acquisition de données cartographiques, structurales, pétrologiques, géochimiques, géochronologiques, géomécaniques des roches cristallines et sédimentaires, (2) la réalisation d'une cartographie détaillée des formations du régolithe, (3) des acquisitions géophysiques en sismique réflexion écoute longue, tomographie, aéromagnétisme, gravimétrie et couverture gamma-spectrométrique aéroportée (Th, U, K). Les nouvelles acquisitions géophysiques sont incontournables pour contraindre la géologie de surface et la structure profonde de la croûte et de la lithosphère sous et à la périphérie du MCF. Ces outils d'imagerie à la fois détaillée et d'échelle régionale permettront d'étendre de façon homogène l'information de la géologie de surface aux 200-300 premiers mètres du sous-sol, avec des objectifs tant scientifiques qu'appliqués. Des données de sismique réflexion documenteront la géométrie des unités tectoniques de la croûte Varisque, la profondeur du Moho et la limite lithosphère-asthénosphère. L'anisotropie des ondes sismiques fournira une imagerie des flux mantelliques à corrélérer avec l'évolution morpho-tectonique récente. La combinaison des coupes sismiques avec les données gravimétriques (au sol) et aéromagnétiques, assureront par modélisation 2D et 3D la corrélation des structures vues en sismique à l'échelle de sous-régions du MCF. L'objectif général est de constituer un référentiel géologique 3D des premiers kilomètres de la croûte, cohérent avec la cartographie de surface. En complément les travaux de terrain auront pour objectif de réviser les cartes géologiques existantes et d'assurer leur cohérence d'ensemble en lien direct avec les besoins sociétaux (accès aux ressources en eau, en matériaux et mine, en géothermie, évaluation des aléas naturels) ou pour l'aménagement du territoire.

#### **4.4. Apports et livrables potentiels d'un chantier RGF Massif Central français**

Un chantier RGF Massif Central français serait une contribution significative à l'amélioration des connaissances sur des thématiques aussi variées que (1) la formation et la différenciation de la croûte continentale Ouest Européenne, (2) la construction, l'évolution et la destruction de la ceinture orogénique varisque, (3) la circulation océanique et les changements climatiques au cours de la dislocation d'un supercontinent (la Pangée), (4) la dynamique du manteau, la déformation de la lithosphère et le magmatisme dans la zone de convergence Afrique-Eurasie. Ces questions fondamentales ont des répercussions directes sur des enjeux sociétaux que sont (1) la distribution des ressources minérales et des matériaux, (2) le potentiel géothermique, (3) le développement du réseau hydrographique, la recharge des nappes phréatiques et la circulation des eaux thermales et minérales, (4) les risques sismique, d'inondation et de pollution, et enfin (5) l'aménagement du territoire, la valorisation patrimoine naturel et le développement du géotourisme.

En complément de ces apports fondamentaux et appliqués, les livrables possibles d'un chantier RGF « Massif Central » sont très nombreux: (1) bases de données (avec des données normées, répondant aux normes RGF) intégrant des données géologiques, structurales, géochronologiques, géochimiques, géotechniques, hydrologiques, minéralisations, archéologique minière ..., (2) cartes géologiques harmonisées, couplées à des modèles 3D permettant une mise en cohérence des données géologiques, en améliorant en particulier la cartographie des formations du régolithe, (3) cartes paléogéographiques, événementielles, structurales, (4) cartes néotectoniques, hydrologiques, d'occurrences minières (5) cartes/profils géophysiques, imagerie crustale/lithosphérique 3D, (6) modèles géologiques 3D (à différentes échelles) couplés à des modèles d'écoulements de fluides, d'aléa de mouvements sismiques, d'écoulements gravitaires, de risques cavités, d'aléa retrait gonflement, (7) guides géologiques régionaux, ouvrages de vulgarisation, outils pédagogiques destinés aux enseignants du primaire et secondaire (8) excursions de terrain, parcours géologiques, écoles d'été thématiques, écoles de terrain couplant cartographie géologique et modélisation 3D destinées à des étudiants, des enseignants du secondaire, des associations de géologues amateurs, (9) atlas archéologiques miniers, (10) modélisation 3D de sites miniers anciens remarquables.