Risques liés aux émissions naturelles de CO 2 dans l'agglomération de Clermont-Ferrand

Louis de Lary de Latour, Annick Loschetter, Frédérick Gal, Emilie Vanoudheusden, Philippe Rocher, André Burnol, Bernard Collignan

▶ **To cite this version:**

Louis de Lary de Latour, Annick Loschetter, Frédérick Gal, Emilie Vanoudheusden, Philippe Rocher, et al.. Risques liés aux émissions naturelles de CO 2 dans l'agglomération de Clermont-Ferrand. Envirorisk, Jun 2016, Bourges, France. hal-01358694

HAL Id: hal-01358694
https://brgm.hal.science/hal-01358694

Submitted on 1 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Risques liés aux émissions naturelles de CO_2 dans l'agglomération de Clermont-Ferrand

Louis de Lary[1], Annick Loschetter[1], Frederick Gal[1], Emilie Vanoudheusden[1], Philippe Rocher[1], André Burnol[1], Bernard Collignan[2]

[1]BRGM
3, Avenue Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 Orléans
Contact : l.delarydelatour@brgm.fr

[2] CSTB
24. rue Joseph Fourier – 38 400 Saint Martin d'Hères

RESUME

La présence de CO_2 d'origine naturelle magmatique est connue depuis longtemps en Auvergne. Sur l'agglomération de Clermont-Ferrand, des signalements en raison de concentrations anormales de CO_2 ont conduit à la réalisation d'une étude dédiée par le BRGM en 2015. Cette étude concerne l'acquisition de nouvelles données de concentration en gaz d'origine géologique dans les sols et de flux de gaz à l'interface sol/atmosphère, ainsi que leur interprétation en termes de risques pour la santé ou la vie humaine.

Environ 300 mesures ponctuelles de concentrations en gaz des sols d'un cortège gazeux (principalement CO_2, O_2, N_2, ^{222}Rn, ^{4}He) ont été réalisées. La moitié des prélèvements de gaz des sols ont fait l'objet de mesures de flux de CO_2. L'analyse des mesures de terrain montre que 28 points peuvent être sujets, à des degrés divers, à une influence de remontées de gaz profond, soit environ 9 % des mesures. Les mesures montrent une très grande variabilité spatio-temporelle des émissions. Ainsi, une cartographie spatialisée de l'aléa nécessiterait des campagnes de mesures allant largement au-delà de cette étude.

Il ne semble pas exister de zone de dégazage massif géographiquement étendue sur les territoires ayant fait l'objet de mesures. Toutefois, les calculs d'exposition montrent que plusieurs valeurs de flux mesurées en certains points sont susceptibles d'entrainer des risques aigus en cas d'intrusion et de confinement dans des environnements intérieurs occupés. Des propositions de mesures de gestion du risque basées sur la communication et la mise en place d'actions prioritaires sur des zones ciblées ont été proposées.

Mots-clefs— Gestion des risques, CO_2, émanations, agglomération de Clermont-Ferrand

I. INTRODUCTION

A. Contexte et objectif de l'étude

La présente étude concerne l'acquisition de nouvelles données de concentration en gaz d'origine géologique dans les sols et de flux de gaz à l'interface sol/atmosphère dans l'agglomération de Clermont-Ferrand, ainsi que leur interprétation en termes de risques pour la santé ou la vie humaine.

Cette étude a été mise en œuvre suite à plusieurs signalements et alertes auprès des services de l'Etat en raison de concentrations ou flux de CO_2 anormaux. Le programme d'étude comporte deux tâches principales :

1. la réalisation d'une cartographie des émissions gazeuses sur 7 territoires communaux (Clermont-Ferrand, Royat, Chamalières, Ceyrat, Beaumont, Durtol et Nohanent) (Gal *et al.*, 2015);
2. une étude des risques dont l'objectif est de proposer des recommandations d'actions pour la mise en œuvre de la gestion du risque lié au CO_2 (de Lary *et* Loschetter, 2015).

B. Contexte géologique et origine du CO_2

Le CO_2 d'origine naturelle est bien connu dans le Massif Central, en Auvergne en particulier.

A la suite de l'orogenèse alpine et de l'ouverture de la Méditerranée, les failles méridiennes des fossés d'effondrement du Massif Central (Limagne notamment) et les grandes lignes de fractures de direction cévenole (NE-SW), ont joué en distension à partir du Tertiaire. Elles affectent le socle cristallin et ont favorisé la mise en place du volcanisme, en particulier dans le Massif Central. Elles permettent encore la remontée actuelle de CO_2 d'origine magmatique qui caractérise la province des eaux bicarbonatées sodiques du Massif Central.

Cette province carbogazeuse du Massif Central fait partie d'une plus grande province carbogazeuse, d'extension périalpine, qui prend la France en écharpe du Roussillon jusqu'à l'Alsace.

L'agglomération clermontoise, dont le contexte géologique est présenté sur la carte en annexe 1, recèle des témoins de la présence d'eaux minérales gazeuses (cf. Annexe 1) :

- dans le secteur St-Alyre / Les Salins à Clermont-Ferrand, plusieurs ouvrages souterrains ont rencontré de l'eau minérale gazeuse le long d'une zone faillée orientée nord-sud (la source des Salins a été embouteillée par le passé) ;
- dans le site thermal de Royat-Chamalières, actuellement exploité pour le thermalisme, la fraction gazeuse des eaux contient environ 99 % de CO_2.

Présent dans la Grotte du Chien à Chamalières et dans la Grotte Rouge à Royat, le CO_2 a été produit industriellement jadis à Montpensier (jusqu'à 1 t/jour de CO_2 liquide), à une trentaine de kilomètres au nord-nord-est de Clermont-Ferrand (en relation directe avec une importante faille transverse de la plaine de la Limagne) et aux Martres d'Artière (à environ 10 km à l'est-nord-est de Clermont-Ferrand).

Le sujet des risques liés aux émissions de CO_2 a été récemment évoqué suite à plusieurs interventions du SDIS 63 en 2013 et 2014, sur les communes de Clermont-Ferrand, Chamalières et Ceyrat, déclenchées suite au signalement d'odeurs suspectes sur la voie publique, une personne ayant été particulièrement incommodée par de fortes émanations de gaz. L'analyse isotopique d'un échantillon d'air prélevé à Clermont-Ferrand a révélé une origine du CO_2 profonde, magmatique en l'occurrence.

C. Toxicité du CO_2 et compréhension des risques liés aux émissions de CO_2 provenant du sol

Le CO_2 est une substance naturellement présente dans l'environnement (teneur moyenne 0,04% de volume dans l'atmosphère) et essentielle à la vie (*Tableau 1*). C'est un gaz inodore et incolore. Ce gaz est principalement mis au contact de l'organisme par inhalation. Sa densité est supérieure à celle de l'air (1,5), sa masse volumique est d'environ 1,8 kg/m^3 dans les conditions normales.

Tableau 1 - Ordres de grandeurs de concentrations dans différents milieux d'exposition à titre indicatif d'après le GIEC (2005) et l'ANSES (2013)

Milieu	**Atmosphère**	**Sol**	**Bâtiment**	**Eau douce** (20°C, en équilibre avec l'atmosphère)
Teneur en CO_2 (% vol.)	0,04%	0,2 à 4%	0,035 % à 0,25 %	0,6 mg/L

L'exposition à de fortes concentrations peut avoir des conséquences irréversibles ou fatales. Le CO_2 est une substance à seuil, c'est-à-dire que les effets apparaissent à partir d'une certaine dose d'exposition (ANSES, 2013). Les seuils disponibles dans l'état de l'art ont été établis pour les travailleurs : les seuils aigus (exposition forte sur 15 minutes) vont de 1,5 à 3 % de volume dans l'air suivant les réglementations et les pays, tandis que le seuil chronique (exposition 8 h/jour) est la plupart du temps fixé à 0,5 % (Tableau 2).

Tableau 2 - Valeurs limites en milieu professionnel pour le CO_2 en France et à l'étranger.

Seuil	**Valeur** (% vol. CO_2)	**Pays concernés (non exhaustif)**
Valeur limite d'exposition professionnelle indicative (VLEP, 8 heures)	0,5%	France, Union Européenne, Etats-Unis, Royaume Uni
Valeur limite court terme (VLCT, 15 minutes)	1,5 %	Royaume Uni, Espagne
	3%	Etats-Unis
Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH ou Seuil de danger immédiat)	4%	Etats-Unis

Un sol émet normalement et naturellement du CO_2 d'origine biologique issu de la respiration des êtres vivants du sol. Ces émissions biologiques sont faibles et n'entrainent pas de risques. Dans certaines situations géologiques spécifiques (typiquement les zones volcaniques comme à Clermont-Ferrand), du CO_2 d'origine géologique profonde peut aussi être émis localement en surface, en plus du flux biologique, et entrainer des risques d'expositions à de fortes teneurs en CO_2 si les flux sont importants. Dans le sous-sol, le CO_2 peut agir comme un « transporteur » capable de mobiliser d'autres gaz susceptibles d'avoir des effets graves sur la santé ou la vie humaine, par exemple le radon, l'hydrogène sulfuré (H_2S), le dioxyde de soufre (SO_2), etc. Enfin, les fortes concentrations en CO_2 peuvent induire une baisse de la teneur en oxygène pouvant entrainer une asphyxie.

Au niveau scientifique, la compréhension de la migration du CO_2 dans le milieu géologique, de son intrusion au travers des fondations des bâtiments et de son comportement dans l'air intérieur est encore au stade de la recherche. Des projets de recherche sont actuellement en cours sur ces sujets (notamment le projet ADEME IMPACT-CO_2, cf. de Lary et al. 2014).

D. Retour d'expérience sur des sites analogues

L'agglomération clermontoise n'est pas un cas isolé : de nombreuses études font rapport de sites où du CO_2 d'origine géologique dégaze naturellement en surface (Tableau 3).

Les conséquences d'émissions de CO_2 en surface en zone urbaine ont notamment été étudiées sur plusieurs sites en Europe et aux Etats-Unis dans le cadre des études de risques liés aux stockages géologiques du CO_2.

Sur les sites naturels, le CO_2 a tendance à s'échapper par certains points d'émissions préférentiels, appelés parfois « cœur » ou « évent » et pour lesquels les flux mesurés peuvent être très forts (e.g. Beaubien *et al.*, 2008 ; Gal *et al.*, 2011). Sur de nombreux sites, les émissions de CO_2 semblent corrélées à la présence de failles ou de fractures perméables aux gaz (e.g. Annunziatellis *et al.*, 2008 ; Gerlach *et al.*, 1999). Le flux décroit souvent rapidement à mesure que l'on s'éloigne de ces

points. On remarque souvent une grande variabilité spatiale des flux mesurés en surface du sol : les débits mesurés en surface peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur sur des distances de quelques dizaines ou centaines de mètres. Une forte variation temporelle des émissions de CO_2 est souvent constatée, avec parfois des émissions soudaines et massives. Les principales causes énoncées des variations sont : les variations en surface (paramètres climatiques : pression, température, vent…) et les variations au niveau de la source d'émission et des voies de transfert (e.g. activité sismique créant de nouveaux chemins de migration, variations de cheminement en surface en fonction de l'état hydrique des sols, etc.).

Tableau 3 - Exemples de débits de fuite à l'interface sol/atmosphère sur des sites où du CO_2 d'origine géologique s'échappe vers l'atmosphère (synthèse d'après de Lary et al., 2014 et références associées)

Site	Surface totale de fuite (m^2)	Flux sur les zones d'émission ($g/m^2/jour$)		Voie de migration présumée
		moyenne	maximum	
Horse Shoe Lake, Mammoth Mountain (Etats-Unis)	120 000	775	> 10 000	Failles
Ciampino Cava dei Selci (Italie)	10 000	740	108 000	Failles
Latera (Italie)	250	880	>3000	Failles
Tor Caldara (site : « advectif ») (Italie)	200	2000		Failles
Tor Caldara (site : « diffusif ») (Italie)	200	170		Failles
Ma´traderecske (Hongrie)		200 à 400		
Paradox Basin (Etats-Unis)		100		
Laacher See (Allemagne)			600 à 1200	
Sainte Marguerite (France)	5000	90 à 160	7000	Failles

Sur les sites d'émissions naturelles (hors fumerolles), les concentrations en CO_2 en espace ouvert ne sont normalement pas dangereuses pour l'être humain car le CO_2 a tendance à se disperser rapidement dans l'atmosphère. Dans les endroits peu ventilés (cave, etc.), dans les dépressions du relief, ou dans les cavités (trous creusés dans le sol), le CO_2 peut s'accumuler, atteignant des concentrations parfois létales (Annunziatellis *et al.*, 2003 ; Chow *et al.*, 2009). En effet, le CO_2 est un gaz plus dense que l'air. Lorsque sa concentration devient forte, il peut adopter un comportement de gaz lourd (il ne se mélange plus aux autres gaz, la concentration des différents gaz n'est plus homogène) et s'accumuler dans les zones basses, formant une nappe de CO_2. Ainsi, les principaux risques décrits sur ces sites sont liés à l'exposition humaine dans des milieux peu ventilés (ouvrage souterrain, cave, dépression du relief, bâtiment, etc.).

Le principal retour d'expérience public est celui de plusieurs villes italiennes de la périphérie de Rome (dont Marino et Ciampino) qui sont sujettes à des remontées de CO_2 d'origine volcanique (Annunziatellis et al., 2003 ; Carapezza et al., 2007 ; Carapezza et al., 2012). L'intensification des situations d'exposition au CO_2 semble due à plusieurs phénomènes :

- L'urbanisation rapide et récente (due à la pression immobilière en périphérie de Rome). Ainsi, des habitations ont été construites très proches ou même sur des zones d'émissions ;
- Une surexploitation (baisse rapide des niveaux piézométriques) des nappes aquifères de surface qui jouaient probablement un rôle de tampon en dissolvant le CO_2 ;
- Probablement une recrudescence de l'activité sismique de la zone.

Sur le site italien de Ciampino, en 1995, une zone d'environ 10 000 m² a été soudainement affectée par un dégazage massif de CO_2 alarmant les autorités. Du CO_2 en quantité importante a été noté dans les aquifères. Les sous-sols de certaines habitations ont été rendus inaccessibles pendant un certain temps. Lors de certaines éruptions de puits particulièrement violentes, des zones ont été évacuées et certains riverains ont dû être hospitalisés. Des habitations ont nécessité la mise en place de mesures correctives (étanchement des fondations, ventilation) pour devenir à nouveau habitables (Carapezza 2007, Tarchini, 2009). Suite à cette recrudescence des émissions de CO_2 dans les années 1995 à 2000, et aux évènements liés (décès, mort de bétail, caves rendues inaccessibles, etc.), plusieurs campagnes de mesures et études successives ont été réalisées. Sur certains points, les concentrations en CO_2 mesurées dans les sols peuvent aller jusqu'à 90 %. Toutefois, lors de campagnes de mesures sur de grandes étendues, les moyennes de concentrations restent dans des gammes normales car les zones d'émissions sont très localisées. Un état de catastrophe naturel a été déclaré en 2010 pour une zone soumise depuis quelques années à des émissions anormales.

Les autorités Italiennes ont géré le risque principalement en informant le public et les travailleurs et en maitrisant l'urbanisation. Différentes prescriptions sont imposées dans les documents d'urbanisme pour les constructions neuves en fonction des concentrations mesurées dans les sols pour des zones définies par arrêtés :

- concentrations entre 2 et 5 % : des modalités de construction ont été imposées afin de limiter le risque d'exposition au CO_2 pour les habitants et les travailleurs sur les chantiers ;
- concentrations supérieures à 5 % : les zones sont rendues inconstructibles.

Le plan général d'urgence de la protection civile a été modifié pour inclure le risque de relâchement soudain de CO_2.

II. MESURES DE TENEURS EN CO_2 DANS LES SOLS ET DE FLUX SUR L'AGGLOMERATION DE CLERMONT-FERRAND

A. *Méthode*

Au préalable à la réalisation des mesures sur site, des recherches bibliographiques complémentaires dans les bases de données BRGM ont été effectuées afin d'identifier les territoires communaux pouvant présenter la plus grande probabilité d'exposition éventuelle à un aléa gaz (cf. Annexe 1). Ces recherches ont été étendues à l'ensemble du département du Puy-de-Dôme, en ce qui concerne les mesures antérieures réalisées en gaz des sols, afin de déterminer l'intensité des anomalies qui pouvaient être mesurées et leur spatialisation.

En raison de l'étendue des territoires à couvrir, un maillage régulier ne pouvait pas être envisagé pour la campagne de mesures, conduisant donc à cibler directement les zones susceptibles de présenter le plus d'intérêt. Un total de 42 zones a été pré-identifié pour la réalisation de la campagne de mesures, regroupant des zones à accès facile (prairies, forêts, chemin communaux…) et des zones très urbanisées dans lesquelles seules des mesures de flux sont opérées, les mesures de concentration en gaz nécessitant le percement d'un micro-forage.

Sur deux sites, des mesures en continu ont été réalisées pendant plusieurs mois afin de prendre en compte la variabilité naturelle des émanations en gaz (due notamment aux variations de pression atmosphérique et aux cycles jours/nuits).

B. *Mesures de gaz des sols*

Environ 300 mesures ponctuelles de concentrations ont été réalisées. Les concentrations de CO_2 mesurées dans les sols varient entre des valeurs proches de la concentration atmosphérique (0,07 %) et des valeurs très élevées (jusqu'à 100 %) (Tableau 5). La médiane est relativement basse (0,74 %) et la moyenne des concentrations en CO_2 (2,5 %) est conforme à ce que l'on peut attendre d'un sol sous climat tempéré. L'analyse des mesures de terrain montre que 28 points peuvent être sujets, à des degrés divers, à une influence de remontées de gaz profond, soit environ 9 % des mesures.

Dans la littérature, des concentrations en CO_2 dépassant 10 % en volume peuvent être localement rapportées dans des cas où il n'y a pas de fuite profonde avérée (par ex. Gal *et al.*, 2014). Ainsi, pour éviter d'inclure des « faux positifs » dans notre interprétation, il a été choisi de ne pas se cantonner à l'analyse du CO_2 seul et de lui adjoindre la détermination d'autres espèces gazeuses (CO_2, O_2, N_2, ^{222}Rn, ^{4}He). La signature du gaz sur ce cortège gazeux permet en effet de déterminer son origine (biologique ou volcanique). Une nette anti-corrélation entre CO_2 et O_2 existe. Elle est la conséquence de l'existence de deux phénomènes distincts. Le plus fréquent est le mécanisme de remplacement d'une espèce par l'autre à la faveur du processus de respiration aérobie, la production d'une mole de CO_2 entrainant la consommation d'une mole d'O_2. Une origine de surface pour le CO_2 peut alors être proposée. L'autre phénomène, moins fréquent, est celui de la dilution de CO_2 d'origine profonde. Dans ce cas, 5 moles de CO_2 introduites dans le sol, à la faveur de la remontée d'un gaz d'origine profonde, provoquent le déplacement de 4 moles de N_2 et d'une mole d'O_2 (Figure 1), d'où un remplacement dans les proportions de 1 pour 5 soit 20 %. Une dizaine de points répondent à ce second processus, qui devient le processus prépondérant lorsque la concentration en CO_2 dans le sol dépasse 8%.

Tableau 4 - Concentrations mesurées dans les gaz des sols sur l'agglomération de Clermont-Ferrand.

	CO_2	O_2	N_2	^{4}He	^{222}Rn
Moyenne	2.5 %	19,8 %	76,4 %	5,9 ppm	13800 Bq/m^3
Min./ Max.	0,1 à 100%	2,9 à 21%	19,6 à 82% e	2,1 à 126 ppm	10 à 193000 Bq/m^3

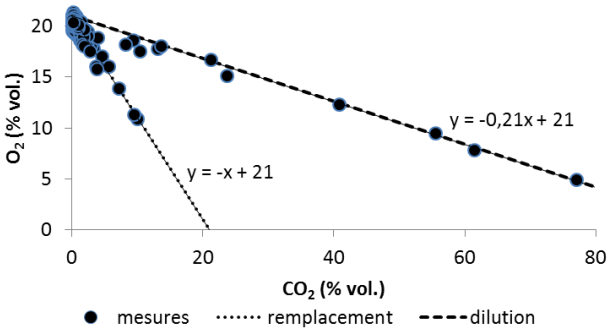


Figure 1 - Relation O_2/CO_2 dans les gaz des sols. Le remplacement est liés au processus biologiques des sols, alors que la dilution indique une origine profonde du CO_2

Les points ayant plus de 13°% de CO_2 sont enrichis en hélium par rapport à la valeur moyenne atmosphérique (5,24 ppm), ce qui renforce l'hypothèse d'une origine profonde de ces gaz. La prise en compte de l'hélium permet également de rajouter une quinzaine de points de mesure pour lesquels une suspicion de remontée de gaz profond (hélium) peut être avancée bien que les concentrations en CO_2 demeurent faibles (moins de 1,2 %). Ainsi, cette étude montre qu'il est nécessaire d'utiliser les données sur l'hélium (en plus du CO_2) pour rechercher les zones de remontées de gaz profonds. En effet, le CO_2 a la propension à facilement réagir avec les eaux et à se dissoudre dans l'eau, ainsi un flux de CO_2 peut être atténué lors de la migration dans le milieu géologique. A l'inverse, l'hélium migre plus facilement dans le milieu géologique jusqu'à la surface.

Les relations entre CO_2 et ^{222}Rn sont complexes et ne permettent pas de dégager de trait marquant. L'hétérogénéité des formations géologiques masque sans doute le rôle du CO_2 en tant que phase porteuse du radon.

Pour les mesures en continu destinée à fournir une chronique de type « bruit de fond environnemental », les concentrations en O_2 et en CO_2 ont des valeurs moyennes de 19,5 et 0,40 respectivement. Les concentrations varient de manière cyclique, avec une période de 24 heures, en relation avec les cycles diurnes/nocturnes, confirmant le caractère

biologique et de proche surface des concentrations et variations observées.

C. Mesures de flux

Les mesures de flux de CO_2 (157 mesures) sont majoritairement inférieures à la valeur seuil de 25 $cm^3/min/m^2$ qui peut être considérée comme représentant la gamme haute des flux de CO_2 mesurables au cours de l'été, dans des zones où des remontées profondes de CO_2 sont totalement absentes. La relation entre flux de CO_2 et concentration en CO_2 dans le sol n'est pas systématique puisque l'émission du gaz en surface dépend de la nature du sol entre 1 m de profondeur et la surface. Néanmoins, les occurrences de fortes valeurs de flux sont retrouvées dans des zones où des concentrations en CO_2 significatives sont mesurées. Des valeurs extrêmes comprises entre 0,9 et 5 litres par minutes de CO_2 ont été mesurées en un point où le gaz s'échappe de façon pulsée.

III. INTERPRETATION DES RESULTATS EN TERMES DE RISQUES

A. Cartographie des zones d'émission

Le caractère ponctuel et localisé des venues de gaz profonds, identifiables sur quelques mètres à quelques dizaines de mètres tout au plus, met en relief la difficulté d'une définition exhaustive des émanations sur un territoire assez grand. Ainsi, une interpolation à caractère géographique n'était pas envisageable avec les données collectées et demanderait des campagnes de mesures probablement disproportionnées.

Les mesures laissent supposer des relations entre les concentrations mesurées dans les sols et le contexte géologique (notamment : les failles, le maar de Clermont-Chamalières) ou encore les indices naturels de CO_2 connus. Toutefois, les mesures effectuées ne permettent pas d'établir de façon systématique des relations avec la géologie. De manière générale, on note un décalage géométrique entre les projections cartographiques des passages de faille et les mesures anormales, ceci pouvant être lié à la porosité presque fermée des fractures majeures et la porosité plus ouverte des fractures secondaires qui leur sont liées.

Les mesures effectuées dans le contexte de la Limagne (donc principalement sédimentaire même si des occurrences volcaniques ou volcano-sédimentaires sont rapportées) ne paraissent pas empreintes d'un marquage de remontées profondes.

Il n'a pas été constaté de corrélation évidente avec le radon ni avec les structures géologiques. Ainsi, les cartes de potentiel géologique d'émission de radon et les cartes géologiques ne peuvent être réutilisées directement pour cartographier « l'aléa » lié aux émissions de CO_2. Enfin, certaines zones non émissives pourraient le devenir suite à des perturbations anthropiques (travaux, forages, fouilles,…) ou suite à des modifications naturelles des voies de migration géologique comme cela semble possible au regard de l'état de l'art.

Pour ces raisons, il n'a pas été possible de définir des cartes « d'aléa » concernant les émissions de CO_2.

B. Modalités d'émission du CO_2

L'analyse des mesures de terrain montre que 28 points peuvent être sujets, à des degrés divers, à une influence de remontées de gaz profond, soit environ 9 % des mesures. On remarque par ailleurs que la médiane est proche de celle mesurée sur les sites italiens de Ciampino et Marino (Tableau 5). Environ 5 % des mesures (Figure 2) montrent une concentration supérieure à 5 %, qui est le seuil à partir duquel les terrains sont considérés comme inconstructibles sur les sites italiens.

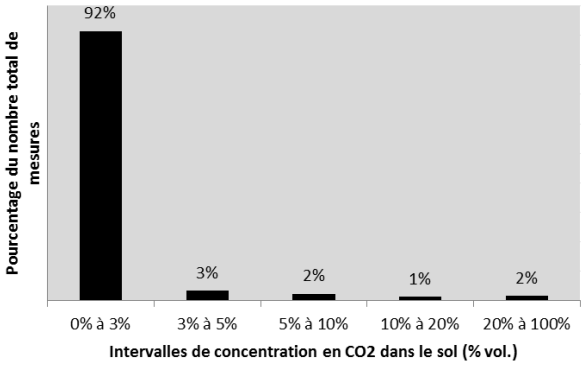


Figure 2 - Répartion des mesures de concentations de CO_2 dans les sols sur l'agglomération de Clermont-Ferrand en fonction de différents intervalles de concentration.

Lorsque la présence de remontées profondes est attestée, il existe fréquemment une hétérogénéité dans les émanations gazeuses, les points présentant les enrichissements en CO_2 les plus importants dans le sol n'étant pas obligatoirement ceux qui présentent les flux de CO_2 à l'interface sol/atmosphère les plus importants. Ceci met bien en évidence la complexité des phénomènes en jeu, avec des effets d'écran ou au contraire des effets favorisant l'émanation du CO_2 suivant la nature du sol. De même, la relation avec les remontées d'hélium n'a pas de caractère systématique, les zones les plus riches en hélium ne coïncidant pas forcément avec les zones les plus riches en CO_2.

Il faut noter que les mesures de concentration sont réalisées dans les sols, et ne permettent pas de déduire directement un risque pour la vie humaine car elles ne sont pas réalisées dans le milieu d'exposition (air intérieur, milieu confiné).

Tableau 5 - Concentrations mesurées dans les gaz des sols sur l'agglomération de Clermont-Ferrand et sur un site italien de référence.

Concentrations en CO_2 dans les sols (%vol.)	**Min.**	**Max.**	**Moy.**	**Médiane**
Agglomération de Clermont-Ferrand	0,07	100	2,55	0,74
Sites italiens (Annunziatellis *et al.*, 2003)	0,1	92,7	4,9	0,9

Les flux anormaux de CO_2 (> 25 $cm^3/min/m^2$ soit environ 65 g/jour/m²) sont localisés : 11 mesures sur 153 dépassent ce seuil. Ils concernent principalement quelques points particuliers d'échappement de gaz (regards de réseaux enterrés, fissures dans les dalles…) situés dans certaines zones où le sol est

revêtu (bitume, béton), rendant les surfaces peu perméables. D'une manière générale, les flux anormaux mesurés sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés sur les sites italiens de référence. Cependant, la valeur maximale du flux mesuré à Clermont-Ferrand est environ trois fois supérieure à celle mesurée sur les sites italiens de Marino et Ciampino.

Des calculs d'exposition simples ont été réalisés en considérant l'intrusion et l'accumulation de CO_2 dans une enceinte (bâtiment, cave, etc.) dont le taux de ventilation est fixé et moyennant un certain nombre d'hypothèses (dont dilution homogène et instantanée du CO_2, régime permanent, maison de 100 m² et hauteur de plafond de 2,5 m, … cf. de Lary *et al.*, 2012 pour les détails du modèle). Les calculs montrent que plusieurs valeurs de flux mesurées en certains points sont susceptibles d'entrainer des risques aigus en cas d'intrusion et de confinement dans des environnements intérieurs occupés.

Les mesures de terrain montrent que les zones d'émissions sont très localisées et que les concentrations peuvent varier de façon très importante en quelques mètres. Ce caractère localisé des zones de fortes concentrations est en accord avec les observations faites sur d'autres sites à l'étranger : le CO_2 a tendance à s'échapper par certains points d'émission préférentiels et le flux décroit souvent rapidement à mesure que l'on s'éloigne de ces points. Ainsi, une des principales conclusions des mesures de terrain est qu'il n'existe pas une zone de dégazage massif et géographiquement étendue sur les territoires ayant fait l'objet de mesures en 2015. Néanmoins, excepté celui de Beaumont, tous les autres territoires communaux explorés ont donné au moins une valeur anormale. La durée limitée de cette campagne de mesures en 2015 n'a pas permis de mettre en évidence de variabilité temporelle des émissions, mais cette variabilité est probablement existante, au regard de l'état de l'art.

L'étude n'a pas mis en évidence de risques liés à d'autres gaz, autres que ceux déjà connus (radon et CO_2).

IV. Discussion sur les modalites de gestion du risque et recommandations

A. Etat de l'art des outils de gestion du risque

Les outils disponibles pour gérer le risque lié aux émanations naturelles de CO_2 sont peu nombreux. En effet, il n'existe pas de protocole de dépistage avec des seuils de gestion, ni même des protocoles de diagnostic pour les bâtiments. Au vu du retour d'expérience, des données disponibles sur la toxicité du CO_2, des mesures réalisées et des calculs de risques simplifiés, le risque aigu (conséquences irréversibles ou fatales) lié à l'exposition à de fortes concentrations sur de courtes durées est le principal risque à gérer. Ceci diffère fortement des autres polluants classiques de l'air intérieur (tels que le radon ou les composés organiques volatils) pour lesquels c'est principalement le risque d'exposition chronique, basée sur des moyennes, qui est à prendre en compte pour évaluer le risque.

En ce qui concerne les mesures de protection pour diminuer le risque dans les bâtiments, une expérience est disponible dans le domaine du radon (Collignan, 2008) et des sites et sols pollués (Leprond et al., 2014).

En résumé et de façon générique, les solutions à mettre en œuvre font appel aux deux principes suivants :

- limiter l'entrée du polluant gazeux,
- diluer la concentration de polluant gazeux dans le bâtiment.

Les types de solution peuvent se regrouper en trois familles de techniques :

- Assurer l'étanchéité du bâtiment vis-à-vis des voies d'entrée du polluant gazeux. Ces techniques sont souvent insuffisantes prises seules mais s'avèrent nécessaires pour la mise en œuvre efficace de toute autre technique. Elles sont donc un préalable essentiel à toute autre action ;
- Traiter la cellule habitée, soit pour diluer la concentration en polluant par une augmentation du renouvellement d'air, soit pour minimiser la dépression du bâtiment (ventilation par insufflation mécanique ou ventilation double flux déséquilibré) et ainsi limiter l'entrée du polluant ;
- Traiter le soubassement (vide sanitaire, cave, dallage sur terre-plein) par ventilation ou mise en dépression.

Toutefois, on remarque que le retour d'expérience permettant de quantifier l'efficacité des mesures au regard d'un risque potentiellement aigu comme dans le cas d'exposition au CO_2, est actuellement limité, voire inexistant.

B. Recommandations pour la gestion des risques

Sur la base des connaissances disponibles sur les risques liés aux émanations de CO_2, du retour d'expérience (notamment des sites italiens) et de l'analyse des mesures effectuées, des recommandations d'actions ont été formulées à destination des autorités. Ces actions pourraient être envisagées à plusieurs niveaux.

Au niveau local les principales recommandations sont les suivantes :

- Adopter une approche de prévention dans le cas général basée sur la diffusion de l'information sur le risque aux différents groupes identifiés (public, travailleurs, personnes susceptibles d'exercer des activités dans des situations de risque accru telles que génie civil, travaux souterrains, forage, etc.). Des suggestions de recommandations qui pourraient être communiquées à chacun des groupes identifiés ont été faites afin d'informer sur les modalités de prévention du risque et d'indiquer la conduite à tenir en cas de suspicion de CO_2 et/ou d'accident. Ces recommandations sont néanmoins à pondérer et à adapter aux spécificités de chaque groupe ;
- Agir de façon prioritaire en vue de réduire le risque sur quelques zones pour lesquelles des émissions potentiellement dangereuses ont été mesurées. Dans ce cas, des solutions sont à envisager pour réduire

l'exposition au risque (ex : interdire ou limiter l'accès) ou réduire l'aléa en limitant le transfert du CO_2 (ex : étanchement des voies d'intrusion) ou encore en diluant le CO_2 dans le milieu (ex : installation de ventilations forcées).

- Mettre en place une stratégie de gestion du risque qui devra être ajustée au fil du temps et de l'expérience acquise. Cette action pourrait notamment comprendre les aspects suivants : diffusion de l'information au niveau de l'urbanisme, organisation du retour d'expérience afin de progresser dans la connaissance du risque, définition des actions à mener en cas de signalement (suspicion de CO_2, mesures anormales, etc.), analyse sur le plan coûts/bénéfices de l'intérêt d'acquérir des capteurs de gaz, qui pourraient être utilisés en cas de signalement pour faire un diagnostic, ou être prêtés aux particuliers ponctuellement, etc.

Une action plus globale de réflexion pourrait aussi être envisagée (au niveau national), car la problématique dépasse le cadre de l'agglomération clermontoise. Les sujets qui pourraient être abordés sont notamment : réflexion sur l'établissement d'un protocole de dépistage et diagnostic, clarification des responsabilités financières et pénales en cas de sinistres, élaboration de travaux de recherche complémentaires sur les modalités d'émission du CO_2 en surface du sol, etc.

REMERCIEMENTS

La présente étude a été financée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne (DREAL Auvergne), la Communauté d'agglomération CLERMONT-COMMUNAUTE, Etablissement Public de Coopération Intercommunale, et le BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, établissement public industriel et commercial, sur sa Subvention pour Charge de Service Public (SCSP). L'étude a été réalisée avec la contribution de l'INERIS pour la réalisation des campagnes de mesures de flux.

REFERENCES

Annunziatellis, A., Ciotoli, G., Lombardi, S., Nolasco, F., 2003. Short- and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy). Journal of Geochemical Exploration 77, 93–108.

Annunziatellis, A., Beaubien, S., Bigi, S., Ciotoli G., Coltella M., Lombardi S. 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): Implicationsfor CO2 geological storage. Int. J. Greenhouse Gas Control,2, 353 – 372.

ANSES, 2013. Concentrations de CO2 dans l'air intérieur et effets sur la santé. Avis de l'ANSES. Rapport d'expertise collective. Juillet 2013. Édition scientifique. Saisine n° « 2012-SA-0093 ». http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AIR2012sa0093Ra.pdf

Beaubien, S.E., Ciotoli, G., Coombs, P., Dictor, M.C., Krüger, M., Lombardi, S., Pearce, J.M., West, J.M., 2008. The impact of a naturally-occurring CO2 gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera Italy). International Journal of Greenhouse Gas Control 2 (3), 373–387.

Carapezza M., Tarchini L., 2007. Accidental gas emission from shallow pressurized aquifers at Alban Hills volcano (Rome, Italy): Geochemical evidence of magmatic degassing. Journal of Volcanology and Geothermal Research 165 (2007) 5–16

Carapezza M., et al. 2012. Hazardous gas emissions from the flanks of the quiescent Colli Albani volcano (Rome, Italy). Applied Geochemistry.

Chow, F.K., Granvold, P.W., Oldenburg, C.M., 2009. Modeling the effects of topography and wind on atmospheric dispersion of CO2 surface leakage at geologic carbon sequestration sites. Proceedings of GHGT-9. Energy Procedia 1 (1), 1925–1932.

Collignan B., 2008. Le radon dans les bâtiments : Guide pour la remédiation des constructions existantes et la prévention des constructions neuves. Guide technique CSTB, juillet 2008.

de Lary, L., Loschetter, A. 2015. Vers une gestion du risque lié aux émissions naturelles de CO2 dans l"agglomération de Clermont-Ferrand. Rapport BRGM/RP-65176-FR, 71 p.

de Lary L., Loschetter A., Bouc O., Rohmer J., Oldenburg CM. (2012) - Assessing health impacts of CO2 leakage from a geological storage site into buildings: role of attenuation in the unsaturated zone and building foundation. International Journal of Greenhouse Gas Control 9, 322–333.

de Lary L., Loschetter A., Bouc O. et al. (2014) - État de l'art, identification des scénarios et formulation des hypothèses de travail. Livrable de la tâche 2.1 du projet ADEME IMPACT-CO2. Convention n° 1394C0032.

Gal F., avec la collaboration de G. Bentivegna, S. Leconte et E. Proust, 2015. Emissions naturelles de gaz carbonique dans le sous-sol de certaines communes de Clermont Communauté. Rapport intermédiaire – Acquisitions sur site. BRGM/RP-65055-FR, 227 p.

Gal, F., Michel, B., Braibant G. et al., 2011. CO2 escapes in the Laacher See region, East Eifel, Germany: Application of natural analogue onshore and offshore geochemical monitoring. IJGGC 2011 (1099-1118)

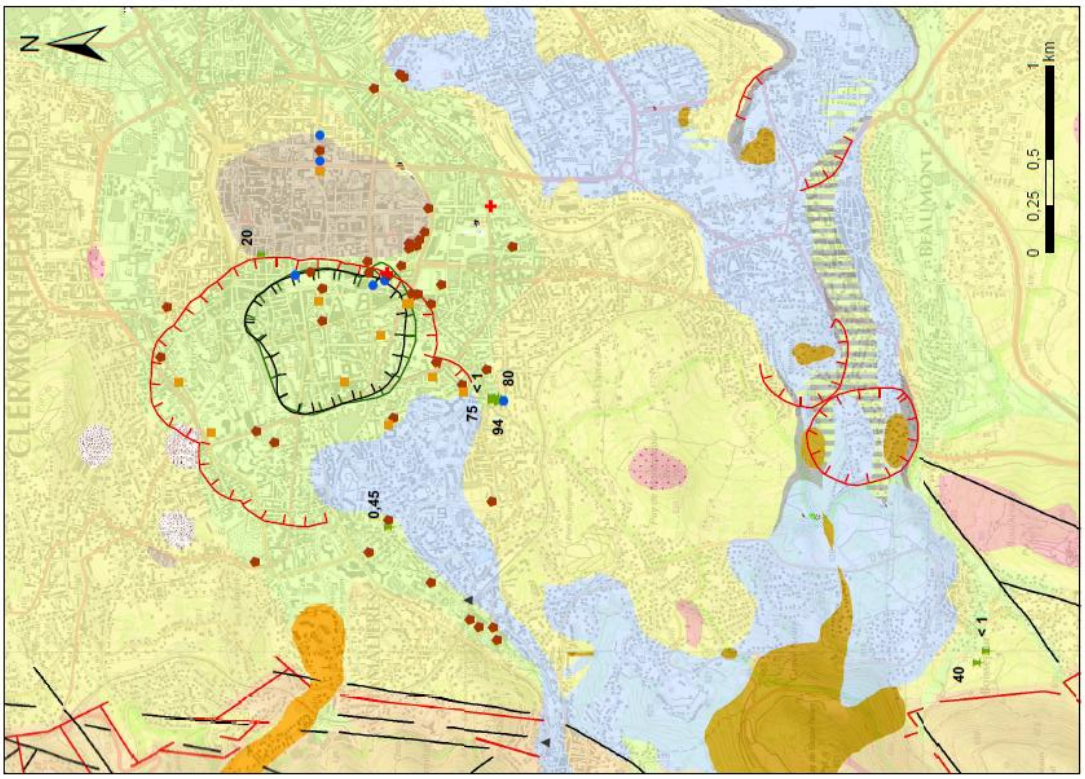
Gerlach, T.M., Doukas, M.P., McGee, K.A., et al., 1999. Soil efflux and total emission rates of magmatic CO2 at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995–1999. Chemical Geology, 177, 101–116.

GIEC 2005. IPPC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,442 p.

Leprond H., Lion F., Colombano S., 2014. Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP. Rapport final BRGM/RP-63675-FR. Août 2014

Tarchini L., 2009. Le emissioni di gas endogeno dei colli albani e dell'isola di vulcano e valutazione della loro pericolosità. Universita' degli studi roma tre dipartimento di scienze geologiche. Dottorato di ricerca in geodinamica.

Annexe 1 : Contexte géologique de l'agglomération de Clermont-Ferrand (nb : les 300 points de mesures aquis lors de la campagne de 2015 ne sont pas reportés sur la carte)



Contexte géologique des émanations de gaz carbonique à Clermont-Ferrand et dans sa banlieue

brgm

Données sur le CO_2
- Lieux de décès
- Fortes odeurs de gaz
- Mesures de CO_2 (valeurs en %)
- CO_2 abondant dans les eaux (d'après Risler)
- Grottes avec venues de CO_2 (mofettes)
- Indice de gaz d'après la BSS

Maars
- Contour d'après Risler, 1980
- Coutour d'après la carte géologique à 1/50.000 de Clermont-Ferrand
- Coutour d'après la carte volcanologique à 1/25.000 de la Chaîne des Puys (5ème édition)

Failles
- D'après la carte géologique à 1/50.000 de Clermont-Ferrand
- D'après la carte volcanologique à 1/25.000 de la Chaîne des Puys (5ème édition)

Formations géologiques d'après la carte volcanologique de la Chaîne des Puys (5ème édition)
- Alluvions
- Avalanche de Grave Noire
- Coulée trachy-andésite
- Coulée trachy-basalte
- Coulée trachy-basaltique cachée
- Débris cône de Grave Noire
- Dépôts d'avalanche cachés
- Produits fins des saupoudrages trachyandésitiques concentrés par le vent
- Projections de maar basaltique
- Pépérites
- Socle
- Sédiments
- Trachy-basalte
- Volcanisme ancien