La dynamique du carbone inorganique dans le continuum sol-épikarst-cavité du site de la Grotte de Lascaux (Dordogne, France) : apports des monitorings hydrogéochimique et microclimatique continus pour l'étude de l'aérologie et le développement d'une méthode de simulation des processus calco-carboniques aux parois

Nicolas Houillon

▶ **To cite this version:**

Nicolas Houillon. La dynamique du carbone inorganique dans le continuum sol-épikarst-cavité du site de la Grotte de Lascaux (Dordogne, France) : apports des monitorings hydrogéochimique et microclimatique continus pour l'étude de l'aérologie et le développement d'une méthode de simulation des processus calco-carboniques aux parois. Sciences de la Terre. Université de Bordeaux, 2016. Français. NNT : 2016BORD0441 . tel-01467170

HAL Id: tel-01467170
https://theses.hal.science/tel-01467170

Submitted on 14 Feb 2017

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.

THÈSE DE DOCTORAT

PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'Université de Bordeaux

Ecole Doctorale Sciences Physiques de l'Ingénieur

Spécialité : Mécanique

Par **Nicolas HOUILLON**

La dynamique du carbone inorganique dans le continuum sol-épikarst-cavité du site de la Grotte de Lascaux (Dordogne, France)

Apports des monitorings hydrogéochimique et microclimatique continus pour l'étude de l'aérologie et le développement d'une méthode de simulation des processus calco-carboniques aux parois.

Sous la direction de : Alain DENIS et Roland LASTENNET

Soutenue le 13 Décembre 2016 devant le jury composé de :

Éric ARQUIS (Professeur - Bordeaux INP)	Président
Jean-Luc MICHELOT (Directeur de Recherches - Université Paris Sud XI)	Rapporteur
Catherine BERTRAND (Maître de Conférences - Université de Franche Comté)	Rapporteur
Christelle BATIOT-GUILHE (Maître de Conférences - Université de Montpellier)	Examinateur
Muriel MAURIAC (Conservatrice Régionale du Patrimoine et de la Grotte de Lascaux)	Invité
Bruno ARFIB (Maître de Conférences - Université d'Aix Marseille)	Invité
Philippe MALAURENT (Ingénieur d'étude - Université de Bordeaux)	Invité
Alain DENIS (Professeur – Université de Bordeaux)	Directeur
Roland LASTENNET (Maître de Conférences – Université de Bordeaux)	Co-Encadrant

Résumé :

Depuis son invention en 1940 mais surtout consécutivement à sa fermeture au public en 1963, la conservation de la Grotte de Lascaux se base entre autres sur la compréhension de ses interactions avec le massif karstique environnant et notamment les processus siégeant dans l'épikarst et la zone de transmission superficielle. C'est pourquoi ces travaux de thèse se sont attachés à comprendre la dynamique du CO_2 dans le continuum sol-épikarst-cavité afin d'en évaluer les potentiels impacts sur la conservation des parois. Nous bénéficions à Lascaux d'une fenêtre d'observation sur les écoulements provenant de l'épikarst sus-jacent dans le SAS 1 de la cavité, mais aussi d'une instrumentation conséquente. Elle permet l'acquisition de nombreuses séries de données temporelles des paramètres microclimatiques ainsi que des teneurs en CO_2 de l'air en différents points de la cavité ou encore du débit de l'émergence épikarstique depuis le début des années 2000.

Une première partie de l'étude est consacrée à la caractérisation de la dynamique du CO_2 dans le contexte d'un épikarst sous couverture pédologique. A cette fin, une parcelle expérimentale est instrumentée afin d'effectuer un suivi des paramètres hydroclimatiques et des teneurs en CO_2 à différentes profondeurs. Des périodes de recharge (accumulation) et de vidange (émanations vers l'atmosphère) du CO_2 de l'épikarst superficiel sont démontrées tout comme la constitution d'un stock de CO_2 peu variable dans l'épikarst subsuperficiel. La compréhension de ces différents mécanismes aboutit à un schéma général de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst.

Cette dynamique est étudiée dans la Grotte de Lascaux au cours d'une seconde partie à partir des séries temporelles des paramètres microclimatiques et des teneurs en CO_2, mais aussi du signal isotopique en ^{13}C. Il est alors démontré que les flux de CO_2 entrant dans la cavité proviennent de trois origines distinctes : l'atmosphère (entrée), l'épikarst superficiel (Galerie Mondmilch et Salles Ensablées) et le massif (éboulis du Puits du Sorcier). Parallèlement, deux régimes aérologiques responsables de la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 dans la cavité sont observés : stratification et thermoconvections. Ils sont les principaux responsables de la dynamique du CO_2 dans la Grotte de Lascaux du fait des faibles échanges entre cette dernière et l'atmosphère comparativement à d'autres cavités karstiques de la région. Enfin, l'impact du dispositif du pompage de l'air sur l'aérologie et la dynamique du CO_2 dans la Grotte de Lascaux est évalué. La comparaison de ces dynamiques avec et sans extraction de l'air de la cavité conduit à la création de schémas conceptuels de la dynamique du CO_2 dans la Grotte Lascaux.

L'étude des conditions d'écoulement dans l'épikarst de la Grotte de Lascaux, troisième partie de ces travaux, a été effectuée à partir d'un suivi en continu des débits, paramètres physico-chimiques et de la fluorescence naturelle de l'eau. L'analyse des séries temporelles de ces traceurs naturels conduit caractériser de façon détaillée les conditions d'écoulement et notamment l'importance de la teneur en eau de l'épikarst sur la taille zone d'alimentation et les types d'eau arrivant à l'exutoire. Parallèlement, l'impact de ces conditions d'écoulement sur les équilibres calco-carboniques des eaux arrivant dans la cavité est analysé.

Enfin, les connaissances acquises sont appliquées pour déterminer l'impact potentiel en continu des eaux (condensation et exfiltration) présentes aux parois ornées de la cavité. A cette fin, une méthodologie d'estimation de la masse de calcite potentiellement précipitée par les eaux d'exfiltration et dissoute par les eaux de condensation basée sur des simulations hydrogéochimiques est développée. Son application à la paroi gauche de la Salle de la Taureaux en contextes de pompage et naturel conduit à l'évaluation de l'impact potentiel du pompage mais aussi de l'aérologie de la cavité sur la conservation des parois.

Mots clés : **Karst, Epikarst, Cavité, Dioxyde de Carbone, Monitoring en continu, Aérologie, Lascaux.**

Abstract:

Since its invention in 1940 but especially as a result of its closure to the public in 1963, the preservation of the Cave of Lascaux bases itself among others on the understanding of its interactions with the surrounding karstic massif in particular the processes sitting in the épikarst and the zone of superficial transmission. That is why this thesis research attempted to understand the dynamics of the CO_2 in the continuum soil-epikarst-cave to estimate the potential impacts on the preservation of walls. We benefit in Lascaux of an observation window on the flows resulting from the epikarst known emergence in the SAS 1 of the cavity, but also the consequent instrumentation. It allows the acquisition of numerous time series data of the microclimatic parameters, carbon dioxide partial pressures at different points of the cave and the discharge of the epikarstic emergence since the beginning of the century.

A first part of the study is dedicated to the characterization of the dynamics of the CO_2 in the context of an epikarst under soil cover. To this end, an experimental parcel is instrumented to follow the hydroclimatic parameters and the contents in PCO_2 at various depths. Periods of recharge (accumulation) and draining (emanations towards the atmosphere) of the superficial epikarst CO_2 are highlighted when the constitution of a low variable CO_2 stock is observed in the subsuperficiel epikarst. The understanding of these various mechanisms ends in a conceptual scheme of the CO_2 dynamics in the epikarst.

In a second part, this dynamic is studied in the Cave of Lascaux from the temporal series of the microclimatic parameters and the contents in CO_2, but also the $\delta^{13}C_{CO2}$. It is then demonstrated that the flows of CO_2 entering the cavity result from three different origins: the atmosphere (entrance), the superficial epikarst (Mondmilch Gallery and Silted-up Rooms) and the massif (screw of the Shaft of the Sorcerer). At the same time, two aerological regimes responsible for the spatiotemporal distribution of the PCO_2 in the cavity are observed: stratification and thermoconvection. They are the main mechanisms responsible for the dynamics of the CO_2 in the Cave of Lascaux because of the low exchanges with the atmosphere. Finally, the impact of the pumping of the air on the aerology and the dynamics of the CO_2. The comparison of these dynamics with and without extraction of the air of the cavity leads to the creation of conceptual schemes of the dynamics of the CO_2 in the Cave Lascaux.

The study of the flowing conditions in the epikarst of the Cave of Lascaux, the third part of these works, was made from a continuous monitoring of the discharge, physico-chemical parameters and the natural fluorescence of the water. The analysis of the temporal series of these natural tracers leads to characterize in a detailed way the flowing conditions and the importance of the moisture content of the epikarst on the size of the recharge area and the types of water arriving at the emergence. In parallel, the impact of these conditions on the calco-carbonic balances of waters arriving in the cavity is analyzed.

Finally, the acquired knowledge are applied to determine the potential continuous impact of the waters (condensation and exfiltration) present at the adorned walls of the cave. To this end, a methodology of estimation of the mass of calcite potentially precipitated by exfiltration and dissolved by condensation based on hydrogeochemical simulations is developed. Its application to the left wall of the Hall of the Bulls with and without pumping leads to the evaluation of the potential impact of this device but also the aerology of the cavity on the preservation of walls.

Keywords: **Karst, Epikarst, Cave, Carbon Dioxide, Continuous Monitoring, Aerology, Lascaux.**

Thèse préparée au sein du laboratoire I2M UMR 5295

Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux

Département Génie Civil Environnemental

Bâtiment B18 Allée Geoffroy Saint Hilaire CS 50023, 33615 Pessac Cedex France

Remerciements

En plus d'être une aventure scientifique semée d'embuches, cette thèse a surtout été une aventure humaine enthousiasmante. Un nombre considérable de personnes de tous horizons, de certains sont devenus des amis, ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail. Ce sont ces rencontres qui sont en grande partie à l'origine du caractère inoubliable de cette expérience. J'ai ainsi eu la chance de me nourrir des nombreux échanges que j'ai pu entretenir avec toutes ces personnes en espérant par la même occasion avoir apporté ma pierre à l'édifice.

Dans un premier temps je souhaite remercier les trois personnes qui m'ont permis de réaliser ces travaux de thèse : Roland LASTENNET, Alain DENIS et Philippe MALAURENT. Ces trois messieurs se sont battus becs et ongles devant le Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux pendant plus d'une année afin d'obtenir le financement nécessaire à la réalisation de cette étude. Je les remercie tout particulièrement pour la grande liberté qu'ils ont su me laisser ainsi que pour leur disponibilité et la confiance qu'ils ont placé en moi de mon stage de master 2 jusqu'à la fin de ces travaux ponctués de plusieurs présentations importantes devant le Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux présidé par Yves COPPENS. Ils ont toujours été présents pour guider mes travaux que ce soit au laboratoire, pour Roland et Alain qui ont patiemment répondu à chacune de mes interrogations lors de nos nombreux brainstormings improvisés dans leurs bureaux respectifs (en laissant à chaque fois de côté leurs obligations personnelles), ou encore sur le terrain avec Philippe. En effet, ce dernier a toujours répondu présent lors de mes nombreuses missions à Lascaux et je tiens à préciser que sans son expertise et sa connaissance de la Grotte, nous n'aurions pas pu acquérir l'immense quantité de données recueillie au cours de ces trois années et pousser aussi loin nos interprétations. Et ce n'est pas tout, sa connaissance infaillible des bonnes adresses culinaires m'a permis de parfaire ma connaissance de la gastronomie périgourdine ! Il aura été un très bon compagnon de voyage tant il a su rendre nos longues heures de route beaucoup plus agréables de par sa bonne humeur et ses nombreuses anecdotes. Je n'oublie pas non plus Nicolas PEYRAUBE, qui bien que non présent dans l'encadrement officiel de cette thèse aura été d'une grande aide d'une part du point de vue scientifiques mais aussi du point de vue logistique en me transmettant tous les trucs et astuces pour mener une thèse, merci docteur P. Et je n'oublierai jamais les excellents souvenirs de nos différents voyages, en duo à Baltimore (USA) où nous avons apprécié (un peu trop) les crabs cakes et les happy hours, bien que cette cité de la côte Est des Etats Unis ne soit pas le plus beau port de pêche que j'ai eu la chance de découvrir, ainsi qu'à Neuchâtel (Suisse) en compagnie de toute l' équipe « hydro » où nous avons pût apprécier les douces soirées suisses de Septembre au bord du lac de Neuchâtel. Je remercie aussi tout particulièrement Damien

BUQUET, Shan XU et Guillaume LORETTE pour les nombreux échanges scientifiques que nous avons pu avoir ensemble mais aussi pour les nombreux bons moments passés en dehors du boulot ! Les amitiés qui en sont nées ou qui se sont renforcées sont autant de liens qu'il adviendra de sauvegarder.

A ces personnes je tiens à ajouter les techniciens de la Grotte de Lascaux : Sandrine GERAUD, Jean-Christophe PORTAIS et Bruno DESPLAT. Ils ont été d'une grande aide au cours de ces travaux. Je remercie Sandrine pour sa bonne humeur mais surtout pour les nombreux prélèvements qu'elle a effectués au cours de la troisième année de cette étude. Il en va de même pour Bruno, jamais avare d'anecdote, il a réchauffé l'atmosphère de nos missions hivernales, mais a surtout réalisé tous les prélèvements des eaux de précipitation analysés au cours de ces travaux. Enfin, comment ne pas exprimer toute ma gratitude à Jean-Christophe, qui en plus d'être un excellent compagnon de tablée, a été d'une grande aide dans la mise en place et le suivi des mesures que ce soit dans la Grotte de Lascaux, mais aussi dans notre parcelle expérimentale. Je n'oublierai jamais ma première entrée dans cette « Chapelle Sixtine » de la Préhistoire en sa compagnie. Dans un registre similaire, j'adresse toute ma gratitude aux personnes de la Direction Régionale des Affaires Culturelles de la Nouvelle Aquitaine qui ont commandé et financé cette étude et notamment Muriel MAURIAC (Conservatrice Régionale du Patrimoine et Conservatrice de la Grotte de Lascaux) et Alain RIEU (Conservateur Général du Patrimoine).

Je veux aussi sincèrement remercier les membres du jury de thèse qui m'ont décernés le titre de docteur de l'Université de Bordeaux : le président Eric ARQUIS, Catherine BERTRAND et Jean-Luc MICHELOT rapporteurs de ce manuscrit, Christelle BATIOT-GUILHE, Muriel MAURIAC et Bruno ARFIB et à nouveau Roland, Alain et Philippe. Je remercie aussi tous les membres du Conseil Scientifiques de la Grotte de Lascaux qui ont subis tout au long de ces trois années de thèse mes présentations orales interminables. Les questionnements des membres référents de notre étude, Jean-Jacques DELANNOY, Baudoin LISMONDE et Bruno ARFIB nous ont permis d'aller plus en avant dans nos travaux et de répondre aux interrogations des conservateurs de la Grotte de Lascaux.

Je tiens aussi à remercier Michel FRANCESCHI de l'ENSEGID ainsi que Moussa ISSAM de la plateforme SHIVA sans qui les analyses isotopiques des prélèvements d'eau n'auraient pu être effectuées. Je remercie aussi le personnel de l'antenne de Pessac du BRGM et notamment Olivier CABARET qui a transporté avec gentillesse mes précieux prélèvements de Bordeaux à Orléans. Et comment ne pas remercier Pierre ANSCHUTZ et Dominique

POIRIER pour m'avoir permis de réaliser de nombreuses analyses hydrogéochimiques au sein de leur laboratoire.

Ces remerciements ne sauraient être complets sans exprimer ma gratitude à l'ensemble des doctorants ainsi qu'à tous le personnel du laboratoire I2M département GCE avec notamment Marie Charlotte LAVENIER sans qui les missions terrain mais aussi la vie du laboratoire ne peuvent se tenir. Je tiens aussi à remercier les différents personnels administratifs qui se sont succédés et qui ont acceptés tout au long de la thèse d'effectuer toutes les lourdes formalités avec parfois des délais très courts imposés par notre domaine d'étude. Enfin, je remercie particulièrement Fabien NAESSENS, technicien du laboratoire qui a toujours répondu présent que ce soit pour des conseils techniques mais aussi sur le terrain malgré son planning très chargé.

Ma famille a été d'un soutien infaillible pour tout ce qui est des petites péripéties de la vie en dehors de la thèse, me permettant ainsi de me concentrer exclusivement sur mes recherches. Je remercie du fond du cœur ma mère et mon père sans qui je ne serais pas arrivé aussi loin, mon frère qui a toujours trouvé le mot pour me faire rire à chaque retrouvaille mais aussi mes grands-parents qui m'ont toujours témoigné leur soutien. Je leur suis reconnaissant d'avoir été présents non seulement durant la soutenance mais aussi après celle-ci. Je tiens aussi à remercier ma belle-famille qui bien que non présente lors de la soutenance m'a toujours encouragé tout au long de ces trois années, rendant ainsi leur déroulement bien plus agréable.

Enfin, même si mon esprit a été focalisé sur le sujet de mon étude, mon cœur n'en est pas moins resté tourné vers ma douce chère et tendre dont le soutien moral de tous les instants fut d'une aide inestimable pour la réalisation de ce travail. J'espère pouvoir un jour lui rendre tout ce qu'elle m'a donné et même plus encore. Pour finir, j'espère que ma petite chérie qui arrivera parmi nous dans les prochains mois, pourra elle-aussi admirer les œuvres monumentales que nos ancêtres nous ont offerts et que la nature nous a fait parvenir à travers les âges. Si tel est le cas, alors tous nos efforts n'auront pas été vains.

« On peut construire quelque chose de beau
avec les pierres qui entravent le chemin. »

Sommaire Général

I. INTRODUCTION GENERALE 27

I.1 PARTICULARITES DU MILIEU KARSTIQUE : IMPLICATIONS POUR L'ETUDE DES ECOULEMENTS DANS LA ZONE NON SATUREE. 30
I.1.1 LE PROCESSUS DE KARSTIFICATION 30
I.1.2 STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA ZNS 33
I.2 OBJET DE L'ETUDE : LA GROTTE DE LASCAUX 37
I.2.1 PATRIMOINE ARCHEOLOGIQUE DE LA GROTTE DE LASCAUX 38
I.2.2 DE LA DECOUVERTE A LA PROTECTION DE LA GROTTE DE LASCAUX 39
I.3 PROBLEMATIQUES DE L'ETUDE 42
I.3.1 OBJECTIFS DE RECHERCHE 42
I.3.2 OBJECTIFS DE RECHERCHE APPLIQUES A LA CONSERVATION DE LA GROTTE DE LASCAUX 45
I.4 STRATEGIE MISE EN ŒUVRE 50
I.4.1 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 50
I.4.2 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 51
I.4.3 LES CONDITIONS ET MODALITES D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 51
I.4.4 LES SIMULATIONS DES IMPACTS POTENTIELS DES EAUX AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX 52
I.5 ORGANISATION GENERALE DU MANUSCRIT DE THESE 52

II. PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE : LA COLLINE DE LASCAUX 53

II.1 CONTEXTES GEOLOGIQUE ET CLIMATOLOGIQUE DU SITE DE LA COLLINE DE LASCAUX 55
II.1.1 CLIMATOLOGIE 55
II.1.2 GEOLOGIE DE LA COLLINE ET DU SITE DE LASCAUX 62
II.2 GEOMORPHOLOGIE ET AMENAGEMENTS DE LA CAVITE DE LASCAUX 72
II.2.1 GEOMORPHOLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 72
II.2.2 AMENAGEMENTS REALISES PAR L'HOMME 77
II.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE LOCAL 81
II.3.1 HYDROGEOLOGIE DE LA COLLINE DE LASCAUX 81
II.3.2 LES ECOULEMENTS DANS LA CAVITE DE LASCAUX 84
II.4 RESUME DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES, GEOMORPHOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DU SITE D'ETUDE 91

III. LA DYNAMIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 93

III.1 ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 96
III.1.1 LE CO_2 DANS LES SOLS ET LA ZONE VADOSE SOUS-JACENTE 96
III.1.2 LE SIGNAL ISOTOPIQUE DU CO_2 DE L'AIR DU SOL ET DU MASSIF : 103
III.1.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST : 108
III.2 MATERIEL ET METHODE : DEVELOPPEMENT ET INSTRUMENTATION D'UNE PARCELLE EXPERIMENTALE. 112
III.2.1 LOCALISATION ET INSTRUMENTATION DE LA PARCELLE EXPERIMENTALE 113
III.2.2 DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF DE MESURE EN CONTINU DU FLUX DE CO_2 SORTANT DU SOL 120
III.2.3 SUIVIS PONCTUELS ANNEXES 124
III.3 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS L'EPIKARST DE LASCAUX ET LES FORMATIONS DETRITIQUES SABLO-ARGILEUSES ASSOCIEES 126
III.3.1 DONNEES DISPONIBLES : 126
III.3.2 ORIGINE ET REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU CO_2 DANS LES SOLS DE LA PARCELLE EXPERIMENTALE 144

III.3.3 INTERPRETATION DE LA REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU CO_2 DANS L'EPIKARST ET LES FORMATIONS DETRITIQUES ASSOCIEES 153
III.3.4 MODELE CONCEPTUEL DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS L'EPIKARST ET LES ALTERITES DU SITE DE LA GROTTE DE LASCAUX 170

IV. DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA GROTTE DE LASCAUX 177

IV.1 PREREQUIS POUR L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET DE L'AEROLOGIE DES CAVITES KARSTIQUES 181
IV.1.1 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LES CAVITES KARSTIQUES 181
IV.1.2 ETAT DE L'ART POUR L'ETUDE DE L'AEROLOGIE DES CAVITES : 185
IV.1.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'AEROLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 187
IV.2 MATERIEL ET METHODE 189
IV.2.1 SUIVI EN CONTINU DES PARAMETRES HYDROCLIMATIQUES EXTERNES ET INTERNES AINSI QUE DES TENEURS EN CO_2 DANS LA CAVITE 189
IV.2.2 LES PRELEVEMENTS D'AIR POUR L'ETUDE DU SIGNAL ISOTOPIQUE DU $\Delta^{13}C$-CO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX 193
IV.2.3 L'ARRET DE L'EXTRACTION POUR L'ETUDE DE L'IMPACT DU POMPAGE SUR L'AEROLOGIE DE LA CAVITE 194
IV.3 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DANS LA CAVITE DE LASCAUX EN CONTEXTE DE POMPAGE 195
IV.3.1 LES DONNEES DISPONIBLES 196
IV.3.2 LES ECHANGES ENTRE L'ATMOSPHERE ET LA CAVITE 207
IV.3.3 PRINCIPAUX MECANISMES AEROLOGIQUES INTERNES A L'ORIGINE DE LA REPARTITION DES PCO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX : 212
IV.4 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DANS LA CAVITE EN CONTEXTE NATUREL : 229
IV.4.1 LES DONNEES DISPONIBLES 229
IV.4.2 ECHANGES ENTRE ATMOSPHERE ET CAVITE 240
IV.4.3 PRINCIPAUX MECANISMES AEROLOGIQUES INTERNES A L'ORIGINE DE LA REPARTITION DES PCO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX : 246
IV.4.4 CONCLUSION SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX EN PERIODE D'ARRET DE L'EXTRACTEUR 255
IV.5 CONCLUSION SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 EN CONTEXTES DE POMPAGE ET NATUREL 262

V. ETUDE PAR LE SUIVI EN CONTINU DES TRACEURS NATURELS DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST ET DE LEURS IMPACTS SUR LA VARIABILITE DES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES AUX EMERGENCES. SIMULATIONS DES PROCESSUS CALCO-CARBONIQUES AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX. 271

V.1 ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE DES MODALITES D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE A L'AIDE DES TRACEURS NATURELS ET ISOTOPIQUES 274
V.1.1 LE COD, TRACEUR DES CONDITIONS D'ECOULEMENT ET DES TEMPS DE RESIDENCE DANS LE KARST 274
V.1.2 UTILISATION DES ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU COMME MARQUEURS DU TEMPS DE SEJOUR DANS LE KARST : 277
V.1.3 LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES ET LE $\Delta^{13}C$-CMTD, INDICATEURS DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LE KARST 278
V.2 MATERIEL ET METHODE : SUIVI EN CONTINU ET PONCTUEL DE L'HYDROGEOCHIMIE DES EAUX DE LA ZONE VADOSE 286
V.2.1 SUIVIS PONCTUELS DES EAUX DE LA ZONE VADOSE 286
V.2.2 DEVELOPPEMENT DU MONITORING EN CONTINU DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES DE L'EMERGENCE EPIKARSTIQUE DU SAS 1 290
V.3 ETUDE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST DE LA COLLINE DE LASCAUX : APPORTS DU SUIVI DES TRACEURS NATURELS ET ISOTOPIQUES 293
V.3.1 LES DONNEES HYDROGEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DISPONIBLES 293
V.3.2 ANALYSE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST DE LA GROTTE DE LASCAUX PAR L'ETUDE DES TRACEURS NATURELS 313

V.3.3 LES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE DE TRANSMISSION 324
V.3.4 INFLUENCE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST SUR LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX AUX EMERGENCES DU KARST DE LA COLLINE DE LASCAUX : 328
V.3.5 CONCLUSIONS SUR LES MODALITES D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST ET DE LEUR IMPACT SUR LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX ARRIVANT DANS LA CAVITE 336
V.4 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE DE SIMULATION HYDROGEOCHIMIQUE DU COMPORTEMENT DES EAUX DE CONDENSATION ET D'EXFILTRATION AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX 338
V.4.1 ENJEUX DE L'ETUDE DES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX AUX PAROIS 338
V.4.2 METHODOLOGIE ET LIMITES DE LA DEMARCHE DE SIMULATION DEVELOPPEE 341
V.4.3 ESTIMATION DE LA MASSE DE CALCITE AFFECTEE THEORIQUE ET DE L'IMPACT DES PRINCIPAUX PARAMETRES D'ENTREE SUR LE RESULTAT FINAL 349
V.4.4 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A LA PAROI GAUCHE DE LA SALLE DES TAUREAUX DE LA CAVITE DE LASCAUX 356
V.4.5 DISCUSSION SUR L'IMPACT DU POMPAGE ET LES PERSPECTIVES D'AMELIORATION DE LA METHODE 364

VI. CONCLUSION GENERALE 367

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 375

ANNEXES 401

Liste des figures

Figure I-1 : Répartition théorique des espèces carbonatées en milieu ouvert à 25 °C (d'après Stum et Morgan, 1981)..... 32

Figure I-2: Structure des écoulements au sein d'un système karstique avec indication des signaux en sortie de chaque compartiment (modifié d'après Charmoille 2003, modifié d'après Smart et Friedrich, 1986). 33

Figure I-3 : Représentation conceptuelle de l'épikarst selon Williams (1988). 36

Figure I-4: Vue panoramique du panneau de la Licorne dans la salle des Taureaux (Cl. Aujoulat)..... 38

Figure I-5: Représentation schématique des circulations d'eau recoupées par une cavité située dans la zone de transmission. A : Infiltration rapide à travers les fractures et fissures ouvertes. B : Ecoulements autour des parois dans la zone finement poreuse. C : Suintements voir ruissellement lorsque le milieu poreux entourant la cavité est saturé. D : Arrivée d'une eau d'infiltration retardée lorsqu'il n'existe pas ou peu de milieu poreux autour de la paroi. E : Exfiltrations par les joints stratigraphiques situés entre les bancs de calcaire recoupés par la cavité (modifiée selon Mangin, 1975)..... 45

Figure I-6 : Schéma conceptuel des processus de transfert d'eau et de carbone inorganique dans les différents compartiments de la zone vadose du karst et une cavité karstique de subsurface. Les écoulements rapides (fractures) ainsi que les écoulements matriciels sont observables. La production de CO_2 est symbolisée par les flèches rouges provenant des horizons superficiels. Les flux de CO_2 gazeux (CO_2g) et dissous (CO_2aq) sont représentés sur la figure. Dans la cavité, les échanges aérologiques avec l'atmosphère sont présentés. La calcite dissoute (CaCO3d) par les eaux de condensation (dont l'occurrence est contrôlée par l'humidité de l'air et la différence

de température entre l'air et la paroi) ainsi que celle précipitée ($CaCO_3p$) suite au dégazage de CO2aq contenu dans les eaux d'infiltration (CO_2d) sont symbolisées aux parois. 49

Figure II-1: Corrélation entre les températures externes moyennes mensuelles mesurées à Lascaux et à Gourdon 56

Figure II-2 : Comparaison des moyennes mensuels et écarts types des températures externes (°C) mesurées sur le site de Lascaux au cours des années 1997 à 2012 et des moyennes mensuelles de 2013, 2014, 2015 et 2016. 59

Figure II-3 : Comparaison des moyennes et écarts types mensuels des hauteurs de pluies (mm) mesurées sur le site de Lascaux de 1997 à 2012 et des hauteurs de pluie mensuelles de 2013, 2014, 2015 et 2016. 61

Figure II-4 : Situation de Lascaux sur la carte géologique synthétique de la bordure Nord-Est du Bassin Aquitain (Infoterre, BRGM). 63

Figure II-5 : Synoptique des principales étapes de l'évolution continentale de la surface des plateaux karstiques du Périgord (Bruxelles et Camus, 2014). 64

Figure II-6 : Extrait de la carte géologique de Terrasson au 1/50 000 (Infoterre BRGM). 65

Figure II-7 : Ecorché géologique du site de la grotte de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014). 68

Figure II-8 : Carte de répartition des unités pédologiques du site de la grotte de Lascaux (Poulenard, 2014). 70

Figure II-9 : Cartographie GPS de la végétation et des sols à proximité de la cavité (Perrin, 2014) 71

Figure II-10 : Plan de la grotte de Lascaux présentant la division de cette dernière en différentes salles (Aujoulat, 2004). 73

Figure II-11 : Représentation en 3D présentant la localisation des différentes salles de la Grotte de Lascaux. Les différentes couleurs permettent de distinguer les limites des différentes zones de la cavité. Le sol et la végétation sont représentés de façons schématiques et n'autorisent donc pas une interprétation précise du point de vue des profondeurs. 74

Figure II-12 : Plan de la grotte de Lascaux comprenant la localisation des différentes salles ainsi que des figures géomorphologiques permettant d'expliquer sa formation par les processus de fantômisation et de creusement en zone épinoyée. La principale arrivée d'eau ainsi que le cheminement passé de ces écoulements à travers les gours dans la cavité sont aussi localisés (modifiée d'après Bruxelles et Camus, 2014). 75

Figure II-13 : Coupes schématiques de la zone d'entrée de la cavité à sa découverte en 1940 (en haut) et actuellement suite à l'implantation des deux SAS de sécurité et de la Salle des Machines (au milieu) (Aujoulat, 2004) 78

Figure II-14 : Représentation schématique du principe d'action de la machinerie sur l'aérologie de la Salle des Taureaux. La représentation des écoulements d'eau dans le massif sus-jacent n'est pas correcte, elle ne doit donc pas être considérée comme telle. 79

Figure II-15 : Représentation schématique (à gauche) du pompage au niveau de l'éboulis de la Grande Diaclase, photographie du tube d'extraction positionné au niveau de l'éboulis (notons la proximité avec le capteur de CO_2). 80

Figure II-16 : Localisation des différentes émergences du système karstique de la colline de Lascaux et des émergences des autres systèmes locaux (d'après Lopez, 2009). 82

Figure II-17 : Coupe schématique de la colline de Lascaux montrant la localisation des deux émergences étudiées au cours de la thèse ainsi que la position de la cavité de Lascaux. 84

Figure II-18 : Les différents écoulements connus dans la cavité de Lascaux. 85

Figure II-19 : Coupe géologique schématique de la partie axiale de la grotte montrant le positionnement de l'émergence épikarstique et le joint stratigraphique principal, responsable des exfiltrations aux parois de la Salle des Taureaux (D'après Lopez, 2009 et Bruxelles et Camus, 2014). 86

Figure II-20 : Photographie montrant l'émergence épikarstique étudié au plafond du SAS 1. Les glissières en inox permettent de récupérer les eaux d'égouttement et de les conduire dans la citerne de relevage à l'intérieur de laquelle l'évolution du niveau d'eau est enregistrée en continu. 86

Figure II-21 : Vues de dessus et en coupe de la citerne de relevage des eaux d'infiltration située dans le SAS 2. 87

Figure II-22 : Représentation schématique des joints de stratification (traits noirs) présents en paroi gauche de la Salle des Taureaux. 89

Figure II-23 : Relevé hydrique de la paroi gauche de la Salle des Taureaux au 25 Août 2016. Les plages d'humidité résultent des écoulements venant des joints stratigraphiques. 90

Figure III-1 : Cycle du carbone organique dans un système forestier (modifiée d'après Henri Jupin, Hachette, 1996)..... 96

Figure III-2 : Schéma simplifié du fractionnement isotopique du carbone lors du passage du composé A au B. Hypothèse 1 : fractionnement nul. Hypothèse 2 : enrichissement en 13C. Hypothèse 3 : appauvrissement en 13C (Peyraube, 2012). 105

Figure III-3 : Le profil du $\delta^{13}C$ du CO_2 dans les sols selon la couverture végétale F: feuillus, R1 and R2: conifères, M: conifères et feuillus (Linglois 2003). 107

Figure III-4 : Mesures ponctuelles de PCO2 dans les formations de remplissage. La figure présente les moyennes saisonnières (en %vol) pour chacun des pénétromètres classés en fonction de l'altitude de la mesure (Lopez, 2009). 109

Figure III-5 : Carte d'interpolation des PCO_2 mesurées dans les différents pénétromètres et chambres de mesures situées dans les formations détritiques et à la surface des calcaires (Lopez, 2009). Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les mesures à l'origine de cette cartographie de la répartition spatiale des PCO_2, étaient réalisées à différentes profondeurs (notées sur la carte). 110

Figure III-6 : Mesure en continu sur le cycle 2006-2007 des teneurs en CO2 et paramètres associés. a) pluie brute journalière et pluie efficace journalière (mm), pression atmosphérique (hPa) et débit journalier à l'émergence épikarstique (m3j-1). b) Chroniques des PCO2 dans les

formations de remplissages, dans les calcaires, dans la galerie Mondmilch, dans le sol au-dessus de la cavité et pCO2eq dans les eaux de l'émergence épikarstique (Lopez, 2009). 111

Figure III-7 : Carte d'interpolation (Inverse Distance Weight) des teneurs en CO_2 au 25/05/2013 dans les sols se développant sur les calcaires épikarstiques (calcisols leptiques) et les altérites est (brunisols pseudoluviques). 114

Figure III-8 : Localisation de la parcelle expérimentale à l'extérieur de l'enceinte de la grotte de Lascaux sur la carte géomorphologique simplifiée (b). Implantation des forages sur la coupe géologique schématique (c). 115

Figure III-9 : Photographie illustrant la mise en place par carottage à l'air comprimée du forage FC4. 116

Figure III-10 : Profil de tomographie de résistivité électrique montrant la présence supposée de calcaire altéré plus argileux au niveau du forage FC4 (Xu, 2015). 117

Figure III-11 : Photographies et schéma du dispositif de mesure développée pour protéger les capteurs de PCO2 et PO2. Le film jaune représente la membrane en polyuréthane. 118

Figure III-12 : Représentation schématique de la parcelle expérimentale mise en place avec les différents forages, capteurs de mesures annexes et centrales d'acquisition des données. La limite stratigraphique entre calcaires et altérites est aussi représentée. 119

Figure III-13 : Photographies à gauche du boitier de mesure composé d'une centrale d'acquisition, d'un programmateur et d'une pompe antiretour, à droite du dispositif de mesure complet implanté sur les calcisols leptiques de la parcelle expérimentale. 121

Figure III-14 : Représentation schématique du dispositif de mesure de flux de CO2 provenant du sol. Les différentes étapes de mesure décrite dans le manuscrit sont représentées (1, 2, 3). 122

Figure III-15 : Localisation des points de mesure de la PCO2 dans les différents sols présents sur le site d'étude. 125

Figure III-16 : Evolution des flux de CO_2 émanant des calcisols leptiques dans la parcelle expérimentale. Les données brutes, les moyennes journalières et les principales statistiques du flux mesuré sont présentées. 127

Figure III-17 : Evolution des teneurs en CO2 moyennes dans les calcisols (rouge) et les brunisols pseudoluviques (vert). 130

Figure III-18 : Séries temporelles complètes de PCO2 enregistrées dans les différents forages de la parcelle expérimentale implantés dans les altérites (1) et dans les calcaires épikarstiques (2). 131

Figure III-19 : Moyennes des PCO_2 mesurées dans les différents forages de la parcelle expérimentale du 01/08/2014 au 01/08/2016 132

Figure III-20 : Evolution des moyennes mensuelles des teneurs en CO2 mesurées dans FR1, FR2, FR3 (haut) et FC1, FC2, FC3, FC4 (bas). 133

Figure III-21 : Evolution des paramètres hydroclimatiques de l'atmosphère et des altérites. (1) Pluies journalières et teneurs en eau volumiques à 0.25 et 0.5 m de profondeur, (2) Pression atmosphérique et (3) températures extérieures et du sol à différentes profondeurs 137

Figure III-22 : Evolution des cumuls mensuels de pluie (1) et des moyennes mensuelles des teneurs en eau volumiques (2). Les températures estimées à différentes profondeurs dans les calcaires ainsi que les moyennes mensuelles de la température extérieure sont aussi présentées (3). 140

Figure III-23 : Signal isotopique du CO_2 mesuré dans les forages de la parcelle expérimentale, exprimé en fonction de la nature de l'encaissant, la profondeur de prélèvement ainsi que la campagne d'étude. 144

Figure III-24 : Evolution de la répartition spatiale des teneurs en CO_2 interpolées par la méthode IDW dans les calcisols leptiques et les brunisols pseudoluviques. 146

Figure III-25 : Zoom sur l'évolution des cumuls de pluie journalier (1), des températures atmosphériques et du sol à 0.5 m de profondeur (2) des teneurs en CO2 mesurées en deux points du maillage (3) mesurés de Mars 2013 à Juin 2013. Les pointillés marquent l'influence de la pluviométrie et donc de la teneur en eau sur la PCO2 dans les calcisols. 148

Figure III-26: Evolution de la teneur en eau du sol et de la pluviométrie (1), de la différence entre la température atmosphérique et du sol à 0.5 m de profondeur (2), de la pression atmosphérique (3) mais aussi des flux de CO_2 émanant des calcisols (4). Les points-tillés marquent les diminutions du flux de CO_2 suite à l'augmentation de la teneur en eau du sol. 150

Figure III-27 : Schémas conceptuels de la dynamique du flux de CO_2 émanant du sol selon l'état hydrique de ce dernier. 152

Figure III-28 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FC1 et FC2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'augmentation des PCO_2 suite à l'augmentation de la teneur en eau. Les points et tiret soulignent quant à eux le début de la décroissance des PCO_2 causée par la diminution de la teneur en eau. 154

Figure III-29 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FC1 et FC2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/05/2015 au 01/10/2015. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'augmentation des PCO_2 à 1 m de profondeur quand les points et tirets soulignent l'augmentation à 2 m de profondeur suite à l'augmentation de la teneur en eau. 156

Figure III-30 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les pluies journalières sont aussi présentées. 158

Figure III-31 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/012/2014. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'accumulation du CO_2 à 1 et 2 m de profondeur corrélée à l'augmentation de la teneur en eau du sol. 159

Figure III-32 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 15/07/2015 au 01/10/2015. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'accumulation du CO_2 à 1 m de profondeur corrélée à l'augmentation de la teneur en eau du sol. Les points et tirés soulignent l'augmentation retardée de la teneur en CO_2 à 2 m de profondeur. 161

Figure III-33 : Evolution des températures simulées de 0 à 10 m de profondeur dans l'épikarst et des teneurs en CO2 dans FC2 et FC4 du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les rectangles rosés

soulignent les périodes au cours desquelles le gradient thermique permet la mise en place du transfert par advection entre les deux points de mesure. 164

Figure III-34 : Evolution de la pression atmosphérique et de la PCO_2 dans FR3 du 01/08/2014 au 01/03/2016. Les pointillés marquent un changement important de la réponse aux variations barométriques du signal de PCO_2 166

Figure III-35 : Corrélation entre la pression atmosphérique et la teneur en CO2 dans FR3. Les mesures montrent une corrélation forte pour le mois d'Avril 2015. A contrario, la PCO2 est faiblement corrélée à la pression atmosphérique pour le mois de Juin 2015. 167

Figure III-36 : Représentations schématiques des phases de décompression (gauche) et compression (droite) de la masse d'air présente sous la lentille argileuse dans les altérites. 168

Figure III-37 : Evolution des PCO_2 dans FR3 et FC3 mise en parallèle avec la pression atmosphérique, la teneur en eau du sol et les cumuls de pluie journaliers. 170

Figure III-38 : Schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites associées au cours de la période de recharge (accumulation) au printemps. Les zones de production (sol), d'accumulation (épikarst superficiel) et de stock (épikarst subsuperficiel) sont représentées pour l'épikarst. Une zone d'échange est présente dans les altérites superficielles. 174

Figure III-39 : Schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites associées au cours de la période de vidange (émission vers l'atmosphère) de l'été à la fin de l'hiver. Les zones de production (sol), de vidange (épikarst superficiel) et de stock (épikarst subsuperficiel) sont représentées pour l'épikarst. Une zone d'échange est présente dans les altérites superficielles. 175

Figure IV-1 : Localisation des différents capteurs implantés dans la cavité de Lascaux et utilisés au cours de l'étude. 191

Figure IV-2 : Ampoules en verre de 500 ml utilisée pour les prélèvements de gaz. 193

Figure IV-3 : Prélèvements de gaz dans la cavité avec de gauche à droite : la Salle des Taureaux, les Salles Ensablées, le Puits du Sorcier, la Galerie Mondmilch et le Haut de la Diaclase. 194

Figure IV-4 : Comparaison des moyennes annuelles de PCO_2 mesurées dans les différentes salles de la cavité en 2013 et 2014. 197

Figure IV-5 : Evolution des moyennes mensuelles de PCO_2 mesurées dans les différentes zones de la cavité de 2013 à 2014. 198

Figure IV-6 : Evolution des données brutes de PCO_2 mesurées dans les différentes parties de la cavité de 2013 à 2014. En haut, les teneurs en CO_2 mesurées dans la Grande Diaclase, en bas, les teneurs en CO_2 mesurées dans les parties axiale et droite. 200

Figure IV-7 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2013 à Décembre 2014 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. 204

Figure IV-8 : Evolution des températures moyennes mensuelles de la roche de Janvier 2013 à Décembre 2014 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. 206

Figure IV-9 : Evolution de la différence entre la masse volumique de l'air atmosphérique extérieure et de l'air de la Salle des Taureaux pour l'année 2014. Le remplissage rouge signale les périodes au cours desquelles la masse volumique est supérieure pour l'air atmosphérique extérieure et peut donc permettre la ventilation de la cavité de Lascaux. L'évolution de la teneur en CO_2 dans la Salle des Taureaux est aussi présentée. La zone verte signale la période de l'année au cours de laquelle les échanges sont théoriquement faibles. 208

Figure IV-10 : PCO2 moyennes sur l'année 2013 en fonction de la profondeur des points de mesure. 209

Figure IV-11 : Positionnement des différentes mesures dans le repère de Keeling pour la campagne du 28/05/2014 (en haut à gauche), du 05/12/2014 (en haut à droite) et pour les deux campagnes confondues (en bas). Une échelle logarithmique est utilisée par l'axe 1/PCO2 pour permettre une visualisation correcte des points de mesure. Les relations données pour chaque graphique représentent les équations des régressions de Keeling dans le repère $\delta^{13}C\text{-}CO_2 = f(1/PCO_2)$. 210

Figure IV-12 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et des PCO2 mesurées dans les parties axiale et droite de la cavité du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique. 213

Figure IV-13 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et de la PCO2 mesurée au Bas de la Diaclase du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets montrent signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique. 215

Figure IV-14 : Evolution des températures (haut) et des PCO_2 (bas) dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS du 01/02/2013 au 01/10/2013. Les marqueurs signalent l'homogénéisation successive des différents signaux de PCO_2. L'augmentation soudaine des PCO2 au début du mois de Mai 2013 est causée par un arrêt inopiné du dispositif d'extraction de l'air de la cavité. 217

Figure IV-15: Evolution des températures et PCO_2 dans la ST et le DA (en haut à gauche), la ST et le PAS (en haut à droite), la ST et l'ABS (en bas à gauche) et enfin dans les quatre salles (en bas à droite) pour les années 2013 et 2014. Les encadrements bleutés signalent les périodes de convection..... 219

Figure IV-16 : Evolution des températures dans la Grande Diaclase et de la PCO_2 mesurée en Bas de la Diaclase au niveau de l'éboulis au cours de l'année 2014. Les tirets signalent une période d'arrêt inopiné de l'extraction d'air. 221

Figure IV-17 : Cartes d'interpolation des PCO_2 dans la cavité de Lascaux en 2013 et 2014. 223

Figure IV-18 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) dans la Grande Diaclase en contexte de pompage. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés. 225

Figure IV-19 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) en contexte de pompage dans la zone droite. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés. 227

Figure IV-20 : Comparaison des moyennes annuelles de PCO_2 enregistrés avec les 11 capteurs de CO_2 présents dans la cavité pour les années 2015 et 2016. 230

Figure IV-21 : Evolution des moyennes mensuelles de PCO2 aux différents points de mesure de Février 2015 à Août 2016. 231

Figure IV-22 : Evolution des PCO_2 brutes aux différents points de mesure de la cavité de Février 2015 à Août 2016. 233

Figure IV-23 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2015 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. 237

Figure IV-24 : Evolution des températures moyennes mensuelles de la roche de Janvier 2015 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. 239

Figure IV-25 : Evolution de la différence entre la masse volumique de l'air atmosphérique extérieure et de l'air de la Salle des Taureaux de Févier 2015 à Février 2016. Le remplissage rouge signale les périodes au cours desquelles la masse volumique est supérieure pour l'air atmosphérique extérieure et peut donc permettre la ventilation de la cavité de Lascaux. L'évolution de la teneur en CO_2 dans la Salle des Taureaux est aussi présentée. 241

Figure IV-26 : Relation entre profondeur et PCO_2 moyennes des différents points de mesure dans la cavité pour l'année 2015. Les parties axiale et droite sont présentées séparément de la Grande Diaclase. 242

Figure IV-27 : Représentation des 21 échantillons de $\delta^{13}C$-CO_2 dans le repère de Keeling pour les campagnes de prélèvements du 24/02/2015 en haut à gauche, du 04/05/2015 en haut à droite, du 23/02/2016 en bas à gauche et enfin pour toute campagne confondue en bas à droite. 243

Figure IV-28 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et des PCO_2 mesurées dans les parties axiale et droite de la cavité du 01/02/2015 au 01/07/2015. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique. 247

Figure IV-29 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et de la PCO_2 mesurée au Bas de la Diaclase du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique. 249

Figure IV-30 : Evolution des températures et des PCO_2 mesurées dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS du 01/02/2015 au 01/06/2016. Les remplissages bleutés (convections généralisées) et rouges (convections restreintes) marquent les périodes au cours desquelles les températures et les PCO_2 permettent de mettre en évidence différents régimes aérologiques. 251

Figure IV-31 : Evolution des températures et PCO_2 mesurées en BD, HD et dans les SE du 01/02/2016 au 01/08/2016. Les zones bleutées, rouges et verte signalent les périodes au cours desquelles les transferts convectifs se mettent en place dans la Grande Diaclase. 253

Figure IV-32 : Cartes d'interpolation de la répartition spatiale des teneurs en CO_2 dans la cavité de Lascaux au cours des années 2015 et 2016. Les mois de Février, Mai et Septembre sont mis en avant car ils permettent de mettre en lumière les périodes au cours desquelles la répartition spatio-temporelle des PCO_2 dans la cavité est différente. 256

Figure IV-33 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) dans la Grande Diaclase en contexte naturel. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés. 258

Figure IV-34 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) en contexte de pompage dans la zone droite. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés. 261

Figure IV-34 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2013 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. L'arrêt du pompage est marqué par les pointillés. 264

Figure IV-35 : Evolution des différences de température entre la roche et l'air (Troche-Tair) pour les différents points de mesure de la cavité de 2013 à 2016. Les pointillés marquent l'arrêt du pompage. Les zones en rouge signalent les périodes potentielles de condensation aux différentes parois suivies. 266

Figure IV-36 : Evolution des PCO_2 mesurées dans les différentes zones de la cavité. Les encadrés bleutés marquent les périodes au cours desquelles les thermoconvections sont mises en place dans les parties axiale et droite. Les encadrés rouges marquent les périodes de thermoconvections dans la Grande Diaclase. Les pointillés marquent l'arrêt du pompage. . 270

Figure V-1 : Continuum entre carbone organique particulaire (POC) et dissous (DOC) dans les eaux naturelles (Lee et al., 2004). 275

Figure V-2 : Diminution de la concentration en COD au cours de l'infiltration des eaux du sol vers la zone saturée de l'aquifère (modifiée par Batiot, 2002 d'après Thurman, 1985). 276

Figure V-3 : Evolution potentielle d'une eau dans le repère (-log(PCO_2eq) ; ISc). Les points [A], [B] et [C] sont des états d'équilibre entre les trois phases (gazeuse-liquide-solide), E et F sont des états transitoires extrêmes. Les points G et D ne sont pas en équilibre avec la calcite et correspondent à la suite de l'évolution de l'eau vers un milieu hypothétique à PCO2 plus ou moins élevée qu'en [C] (Peyraube (2011). 282

Figure V-4 : $\delta^{13}C$ des différentes formes du système calco-carbonique (modifiée d'après Lopez, 2009). 285

Figure V-5 : Dispositif de récupération des eaux s'infiltrant du sol vers l'épikarst. 287

Figure V-6 : Photographie de la configuration du site de mesure dans le SAS 1 compartiment 3. 290

Figure V-7 : Schéma du dispositif de suivi en continu des paramètres physico-chimiques et de la fluorescence à 370 nm de l'eau de l'émergence épikarstique du SAS 1. 291

Figure V-8 : Evolution des différents éléments majeurs retrouvés dans les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée. 294

Figure V-9 : Evolution des différents isotopes de la molécule d'eau ainsi que de l'excès de deutérium pour les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée. 297

Figure V-10 : Comparaison des mesures isotopiques des pluies et de la droite météorique locale (DML) avec la droite météorique mondiale (DMM) dans le repère $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$. 298

Figure V-11 : Evolution des différents éléments majeurs, silice dissoute et COD retrouvés dans les eaux des calcisols du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée. 300

Figure V-12 : Dates de prélèvements de l'émergence épikarstique du SAS 1 (rouge) et de la source de la Haute Fageotte (en vert). L'hydrogramme de l'émergence épikarstique pour la période d'étude est aussi présenté. 304

Figure V-13 : Evolution des différents éléments majeurs, silice dissoute et COD retrouvés dans les eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée. 305

Figure V-14 : Comparaison des mesures isotopiques des pluies, et des eaux des émergences du SAS 1 et de la Haute Fageotte, de la droite météorique locale (DML) et de la droite météorique mondiale (DMM) dans le repère $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$. 308

Figure V-15 : Courbes d'étalonnage déterminées par comparaison des analyses en COD en laboratoire et fluorescence mesurée in-situ à 370 nm à l'émergence épikarstique du SAS 1. Les relations numériques entre ces deux paramètres sont aussi présentées. 309

Figure V-16 : Evolution des paramètres physico-chimiques et du COD enregistrés en continu à l'émergence épikarstique du SAS 1 de Décembre 2013 à Juillet 2016. Les trous dans les séries données correspondent soit aux périodes de tarissement de l'écoulement ou encore à des problèmes d'alimentation des centrales d'acquisition. 310

Figure V-17 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2013-2014. Les pointillés marquent les pics de crue. 316

Figure V-18 : Evolution des concentrations en COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 du 25/01/2014 au 15/02/2014. Les pointillés marquent les changements significatifs des paramètres mesurés au cours d'une même crue. Les annotations 1, 2 et 3 montrent la participation des différents types d'eau. 318

Figure V-19 : Evolution des concentrations en silice dissoute et en COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 du 15/03/2014 au 01/05/2014. Les pointillés marquent les changements significatifs des paramètres mesurés au cours d'une même crue. 319

Figure V-20 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2014-2015. Les pointillés marquent les pics de crue. 322

Figure V-21 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2015-2016. Les pointillés marquent les pics de crue. 323

Figure V-22 : Evolution du $\delta^{18}O$ de la molécule d'eau retrouvé dans les eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée. 326

Figure V-23 : Evolution des concentrations en COD, Silice dissoute (SiO_2) et en nitrates (NO_3^-) ainsi que de la conductivité électrique mesurées à la source de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 327

Figure V-24 : Position des mesures effectuées de 2013 à 2016 aux émergences de la Haute Fageotte dans le repère ISc = f(-log(PCO_2éq)). Les droites modèles sont présentées pour les deux émergences pour chaque cycle et prolongée si nécessaire en pointillés pour permettre une visualisation de la PCO_2sat moyenne de chaque modèle. 330

Figure V-25 : Evolution des PCO_2sat de l'émergence épikarstique et de la source de la Haute Fageotte mesurées de Janvier 2015 à Juillet 2016. Les PCO_2 enregistrées en continu dans les forages FR3 et FR4 de la parcelle expérimentale sont présentées en parallèle. 332

Figure V-26 : Evolution des paramètres décrivant les équilibres calco-carboniques des écoulements du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2015-2016. Les pointillés signalent les pics de crues enregistrés au SAS 1. L'évolution de la PCO_2 mesurée dans le forage FR4 de la parcelle expérimentale est aussi présentée. 334

Figure V-27 : Schéma conceptuel du processus physico-chimique à l'origine de la précipitation de calcite (flèches orange) par la mise à l'équilibre des eaux d'exfiltration aux parois d'une cavité. La configuration de l'arrivée de l'eau par exfiltration à travers un joint stratigraphique utilisée ici est semblable à celle de la paroi gauche de la Salle des Taureaux. Les paramètres en italiques représentent les principales grandeurs physico-chimiques de chaque phase impliquée dans le processus de précipitation. 340

Figure V-28 : Schéma conceptuel du processus physico-chimique à l'origine de la dissolution de calcite sur une paroi (flèches verte) par la mise à l'équilibre de l'eau de condensation chargée en CO_2 de l'air de la cavité. Les paramètres en italiques représentent les principales grandeurs physico-chimiques de chaque phase impliquée dans le processus de précipitation. 341

Figure V-29 : Démarche de simulation de l'impact des eaux de condensation aux parois de la cavité de Lascaux. 343

Figure V-30 : Démarche de simulation de l'impact des eaux d'exfiltration aux parois de la cavité de Lascaux. 344

Figure V-31 : Corrélation entre volume d'eau condensable et différence de température entre air et paroi gauche de la Salle des Taureaux pour les années 2014 et 2015. 350

Figure V-32 : Relation entre volume d'eau et masse de calcite dissoute ($mCaCO_3$ dissoute) pour des PCO_2 de l'air de la cavité différentes. 351

Figure V-33 : Relation entre volume d'eau et masse de calcite précipitée ($mCaCO_3$ dissoute) pour des PCO_2 de l'air de la cavité différentes. 351

Figure V-34 : Temps de mise à l'équilibre de l'eau de condensation avec l'air et la calcite pour différentes PCO_2 de l'air. Pour ce graphique, un litre par mètre carré de condensation est considéré. 353

Figure V-35 : Temps de mise à l'équilibre de l'eau d'exfiltration avec l'air et la calcite pour différentes PCO_2 de l'air. Pour ce graphique, un litre par mètre carré d'eau est considéré. 354

Figure V-36 : Comparaison de la masse de calcite précipitée pour un litre d'eau d'exfiltration pour une PCO_2sat initiale de l'eau de 5% (vert clair) et 3 % (vert foncé). 355

Figure V-37 : Graphique montrant la relation entre PCO_2 de l'air et masse de calcite dissoute pour un litre d'eau de condensation. 357

Figure V-38 : Graphique montrant les relations entre PCO_2 de l'air et masse de calcite précipitée pour un litre d'eau d'exfiltration selon le chimisme de cette dernière. En bleu la relation pour une PCO_2sat initiale de 5 %, en rouge pour une PCO_2sat initiale de 3%..... 358

Figure V-39 : Evolution de la masse de calcite potentiellement affectées par les processus de précipitation pour des eaux d'exfiltration ayant une PCO_2sat initiale de 3 % (vert foncé) et 5% (vert clair) (a) et de dissolution (b) pour l'année 2014. Parallèlement sont présentées l'évolution des différences de température entre roche et air (c), le remplissage rouge signale la période potentielle de condensation ainsi que l'évolution de la PCO_2 mesurée dans l'air de la Salle des Taureaux. La période d'exfiltration au joint stratigraphique est aussi présentée tout comme celle du régime de stratification des masses d'air (grisé). 360

Figure V-40 : Evolution de la masse de calcite potentiellement affectées par les processus de précipitation pour des eaux d'exfiltration ayant une PCO_2sat initiale de 3 % (vert foncé) et 5% (vert clair) (a) et de dissolution (b) de Février 2015 à Février 2016. Parallèlement sont présentées l'évolution des différences de température entre roche et air (c), le remplissage rouge signale la période potentielle de condensation ainsi que l'évolution de la PCO_2 mesurée dans l'air de la Salle des Taureaux. La période d'exfiltration au joint stratigraphique est aussi présentée tout comme celle du régime aérologique de stratification des masses d'air (grisé). 362

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Températures extérieures moyennes et hauteurs de pluie totales de 1997 à 2012 et pour les années 2013, 2014 et 2015. La température extérieure moyenne de l'année 2016 n'est pas présentée ici car cette dernière est en cours. 57

Tableau III-1: Taux de photosynthèse net de plantes agricoles, herbacées et d'arbres soumis à des conditions de croissance favorables (Nelson et al., 1984) 98

Tableau III-2 : Composition isotopique de différents réservoirs de carbone (Ghashghaie et al., 2001)..... 104

Tableau III-3 : Mesures de PCO_2 dans les calcisols leptiques et brunisols pseudoluviques effectuées au cours des différentes campagnes. Les moyennes, écarts types, coefficients de variation, minimums et maximums sont aussi présentés. 129

Tableau III-4 : Statistiques descriptives pour les PCO_2 mesurées toute au long de l'étude dans les forages de la parcelle expérimentale..... 132

Tableau III-5 : Statistiques descriptives calculées à partir des séries temporelles complètes (Août 2014 à Août 2016) des différents paramètres hydroclimatiques acquis au cours des travaux de thèse (T : températures, H : teneur en eau volumique)..... 138

Tableau III-6 : Statistiques descriptives des températures simulées de 1 à 10 mètres de profondeur dans les calcaires épikarstiques pour la période allant du 01/08/2014 au 01/08/2016. 139

Tableau III-7 : Récapitulatif des signaux isotopiques du CO_2 prélevé dans les différents forages de la parcelle expérimentale. Les données sont exprimées en $\delta^{13}C_{CO2}$ (‰)..... 142

Tableau IV-1 : Description statistique des différentes PCO_2 mesurées dans la cavité en 2013 et 2014. Le capteur de PCO_2 en Haut de la Diaclase (HD) n'a été installé qu'en 2014. 196

Tableau IV-2: Récapitulatif des résultats d'analyse du $\delta^{13}C$-CO_2 effectuées sur les prélèvements des deux campagnes de l'année 2014. Le signal isotopique du CO_2 atmosphérique est tiré des mesures du NOAA (ESRL Global Monitoring année 2016, les mesures sont effectuées sur le site Mace Head, Irlande). 200

Tableau IV-3 : Moyennes annuelles des températures de l'air mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2013 et 2014. La différence entre l'année 2013 et l'année 2014 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert). 202

Tableau IV-4 : Moyennes annuelles des températures de la roche mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2013 et 2014. La différence entre l'année 2013 et l'année 2014 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert). 205

Tableau IV-5 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et léger). 211

Tableau IV-5 : Description statistique des différentes PCO_2 mesurées dans la cavité en 2015 et 2016. Le capteur de PCO_2 au point ABS 136 cm est tombé en panne au début de l'année 2016. 229

Tableau IV-7: Récapitulatif des résultats d'analyse du $\delta^{13}C$-CO_2 effectuées sur les prélèvements des trois campagnes de 2015 et 2016. Le signal isotopique du CO_2 atmosphérique est tiré des mesures du NOAA (ESRL Global Monitoring année 2016, les mesures sont effectuées sur le site Mace Head, Irlande). 234

Tableau IV-8 : Moyennes annuelles des températures de l'air mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2015 et 2016. La différence entre l'année 2015 et l'année 2016 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert). 235

Tableau IV-9 : Moyennes annuelles des températures de la roche mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2015 et 2016. La différence entre l'année 2015 et l'année 2016 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert). 238

Tableau IV-7 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et membre léger). 243

Tableau IV-8 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement

dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et léger) avec un $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger est alors fixé à -24.5 ‰. 245

Tableau IV-9 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à trois pôles (atmosphère, léger 1 et léger 2). 268

Tableau V-1 : Facteurs de fractionnement du $\delta^{13}C$ pour les différentes formes de carbone en fonction de la température T en °Kelvin. 284

Tableau V-2 : Statistiques descriptives des différents éléments chimiques majeurs retrouvés dans les pluies sur le site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 295

Tableau V-3 : Statistiques descriptives des différents isotopes de la molécule d'eau ainsi que de l'excès de deutérium pour les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 298

Tableau V-4 : Principales valeurs statistiques décrivant les concentrations en ions majeurs, l'alcalinité (HCO_3^-) ainsi que la silice dissoute et le DOC mesurées dans les échantillons d'eau du sol entre Octobre 2013 et Juillet 2016. 301

Tableau V-5 : Principales valeurs statistiques décrivant les concentrations en ions majeurs, l'alcalinité (HCO_3^-) ainsi que la silice dissoute et le DOC mesurées dans les échantillons d'eau du SAS 1 et de la Haute Fageotte entre Octobre 2013 et Juillet 2016. Les prélèvements présentant des balances ioniques supérieures à 6% ne sont pas considérés. 306

Tableau V-6 : Principales valeurs statistiques décrivant les signaux des isotopes de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$), mais aussi du $\delta^{13}C$-CMTD mesurés dans les échantillons d'eau du SAS 1 et de la Haute Fageotte entre Octobre 2013 et Juillet 2016. 307

Tableau V-7 : statistiques des séries temporelles des paramètres physico-chimiques et du COD enregistrés à l'émergence épikarstique du SAS 1. Les différents cycles hydrogéologiques sont dans un premier temps considérés indépendamment puis de façon globale ; 311

Tableau V-8 : Statistiques descriptives des paramètres caractérisant les équilibres calco-carboniques calculés pour les émergences de la Haute Fageotte et du SAS 1 d'octobre 2013 à juillet 2016. 328

Tableau V-9: Principales données d'entrée du modèle pour les simulations des masses de calcite précipitée ou dissoute. 345

Tableau V-10: Masses de calcite précipitées ou dissoutes ($mCaCO_3$) pour un litre d'eau et un mètre carré de support calcitique selon la PCO_2 de l'air de la cavité. 349

Tableau V-11 : Temps estimés par simulation pour la mise à l'équilibre de l'eau de condensation avec l'air et le support calcitique pour différents PCO_2 et volumes d'eau de condensation. 352

Tableau V-12 Temps estimés par simulation pour la mise à l'équilibre de l'eau d'exfiltration (PCO_2sat = 5%) avec l'air et le support calcitique pour différents PCO_2 de l'air et volumes d'eau d'exfiltration. 353

I. Introduction Générale

L'air qui nous entoure est invisible, silencieux et imperceptible. Il fait partie intégrante de notre environnement. L'ensemble gigantesque des molécules gazeuses qui le composent (53 milliards de milliards par cm^3 d'air) dont le dioxyde de carbone (CO_2), vont et viennent, réagissent avec les phases liquide ou solide qu'elles rencontrent. Le système karstique en est l'exemple parfait comme en atteste la définition de Bakalowicz (1999) :

« *Le karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines résultantes de la dissolution des roches carbonatées (calcaire ou dolomie) par l'eau rendue acide par le dioxyde de carbone* ».

Le CO_2 produit dans les sols par la respiration racinaire et la minéralisation de la matière organique revêt donc un intérêt primordial lorsque l'on s'intéresse au système karstique. Il est en association avec l'eau, l'un des principaux facteurs responsables du caractère hétérogène, complexe et évolutif des systèmes karstiques, objets d'étude à forts enjeux du point de vue de la gestion de la ressource en eau. En effet, 20 à 25 % de la population mondiale est estimée comme tributaire de la ressource en eau karstique par l'Organisation des Nations Unies (ONU) qui a lancé dès 1972 à travers le programme PICG (Programme International des Géosciences) de nombreux programmes de recherche sur le milieu karstique. Bien avant cette prise de conscience, de nombreuses études ont été conduites sur ce système particulier depuis plus d'un siècle et les recherches du géographe serbe Jovan Cvijic qui dès 1893 étudia les formes géomorphologiques externes du système karstique. De nombreux hydrogéologues et karstologues se sont ainsi intéressés à travers de nombreuses méthodes, à la compréhension des aquifères karstiques de zone noyée, principales réserves d'eau exploitables de ce système. A contrario, la zone vadose ou zone non saturée (ZNS), n'a été que peu étudiées du fait des faibles ressources qu'elle contient. Elle était considérée comme une boîte noire ayant comme unique rôle de transmettre les sollicitations pluvieuses en direction des aquifères karstiques de zone noyée. C'est à la fin du XXème siècle que cette zone a été observée d'un œil nouveau suite à la mise en évidence de son rôle non négligeable dans les mécanismes de recharge et de minéralisations des eaux d'infiltration (Mudry, 1981; Lastennet, 1994 ; Bakalowicz, 1995; Andreo, 2002). On comprend alors l'importance de mieux apprécier les mécanismes complexes responsables de l'acquisition du signal chimique des eaux transitant ensuite à travers le milieu karstique jusqu'à l'exutoire. Aujourd'hui, l'étude de la ZNS se base majoritairement sur les quelques émergences ainsi que sur les écoulements présents dans les cavités pénétrables. Cette entité du système karstique est un point privilégié pour l'hydrogéologue karstique qui acquiert une fenêtre d'observation d'une valeur inestimable en plein cœur de son objet d'étude.

Avant cela, certaines de ces cavités accessibles à l'Homme depuis plusieurs millénaires ont été des écrins formidables pour le développement de l'art pariétal. Ce patrimoine archéologique inestimable majoritairement daté du Paléolithique supérieur (-35000 à -10000 ans) nous est parvenu à travers les âges grâce à la protection que lui conférait le milieu souterrain. Ce dernier de par la stabilité de ses paramètres microclimatiques (température et humidité de l'air et des parois) a permis une conservation naturelle de ces œuvres jusqu'à leur première invention par Marcelino Sanz de Sautuola à la fin du XIX^{ème} siècle dans la célèbre cavité d'Altamira (Espagne). Après une période de scepticisme ambiant, les découvertes vont alors se multiplier et c'est en 1940 que la Grotte de Lascaux est mise à jour par quatre adolescents. Ils avertissent leur instituteur Léon Laval qui prévient alors l'abbé Breuil. Cette cavité de subsurface inscrite au patrimoine mondial de l'Unesco depuis Octobre 1979, est nichée sur les coteaux d'une colline dans la commune de Montignac (Dordogne, France). Malgré sa petite taille (250 mètres linéaires) et sa faible profondeur (25 mètres), cette grotte contient la plupart des motifs pariétaux les plus imposants du Paléolithique (datés aux alentours de -17000 ans). Les visiteurs purent admirer ces peintures rupestres avant 1963 et la fermeture de la cavité suite à la première crise biologique. Dès lors, l'accent fut mis sur la conservation des ornements pariétaux à travers la compréhension et la gestion des phénomènes pouvant affecter les supports ornés. C'est dans ce cadre et plus particulièrement pour comprendre les mécanismes mis en jeu dans l'environnement karstique de la cavité mais aussi en son sein, que l'Université de Bordeaux intervient dès 1963 par l'intermédiaire du Centre d'Hydrogéologie dirigé par Henri Schoëller. Dès lors, de nombreuses études ont été produites et ont permis de mieux apprécier les phénomènes impliqués dans la conservation des parois ornées et l'environnement karstique de la Grotte de Lascaux.

Ce travail de thèse de 2013 à 2016 entrepris au sein du laboratoire I2M de l'Université de Bordeaux s'inscrit donc dans la continuité de la volonté de protection de la cavité et de la compréhension des phénomènes physico-chimiques intervenant dans la cavité et dans son environnement direct : la zone non saturée du système karstique. En effet, cette étude a pour objectifs principaux de :

- comprendre la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst ainsi que dans la cavité de Lascaux,
- déterminer les modalités et conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst, responsables du marquage géochimique des eaux arrivant dans la cavité ou poursuivant leur infiltration plus en profondeur,

- estimer les équilibres géochimiques des eaux présentes aux parois de la cavité ornée de Lascaux et leurs rôles dans les phénomènes de dissolution et de précipitation de calcite.

Afin de présenter en détails ces objectifs initiaux et la stratégie d'étude mise en place au cours de cette thèse, il paraît nécessaire de présenter les spécificités du contexte de cette étude à savoir la zone non saturée du système karstique de la colline de Lascaux. La Grotte de Lascaux sera de la même manière présentée pour introduire les problématiques liées à sa conservation.

I.1 Particularités du milieu karstique : implications pour l'étude des écoulements dans la zone non saturée.

Le mot « karst » vient de la traduction allemande du terme « Kras », originaire de la région comprise entre le golfe de Trieste, la vallée de la Vipava, la vallée de la Raša et le secteur de la Recka (Bignot, 1972).

I.1.1 Le processus de karstification

La karstification est un processus en constante évolution. Dans le cas de karst classiques (pas d'eau de mer, pas de CO_2 hypogène) ce phénomène dépend essentiellement de deux paramètres que sont :

- Le potentiel de karstification, lié aux conditions hydroclimatiques (flux d'eau, températures, et teneurs en CO_2 du sol et de l'épikarst), ainsi qu'à la géométrie du réservoir et l'existence d'un gradient hydraulique,
- La structure interne du massif : lithologie (milieu carbonaté), fracturation et perméabilité.

Notons que si l'un des facteurs du potentiel de karstification est absent à savoir le CO_2 ou le gradient hydraulique, le processus de karstification ne peut se mettre en place. Les principaux facteurs contrôlant la dissolution des roches carbonatées sont donc les suivants :

- Le CO_2 sous forme gazeuse contenu dans les sols et les formations carbonatées sous-jacentes. Il provient de la respiration racinaire et de l'oxydation de la matière organique par l'activité microbienne. Sous sa forme dissoute (solvant), il est le moteur de la karstification,

- La lithologie et la texture de la roche. En effet, plus la roche est pauvre en Dolomie ($CaMg(CO3)_2$) et riche en Calcite ($CaCO_3$), plus la mise en solution sera rapide (Drever, 1988),
- La fracturation qui permet la mise en place de zones d'écoulement préférentielles et donc de directions de karstification prédominantes.

Le schéma général de la karstification fait donc intervenir une eau qui s'infiltre dans le sol et se charge en $CO2_{dissous}$, puis circule dans le karst pour rejoindre l'exutoire du niveau de base local. Au cours de son transit l'eau dissout la roche ce qui fait de ce processus une interaction triphasique entre la phase gazeuse, aqueuse et solide. L'équation 1 résume les interactions entre ces trois phases avec Me^{2+} le cation divalent (ions magnésium ou calcium) en liaison avec le carbonate (Roques, 1964) :

$$CO_2 + H_2O + MeCO_3 \leftrightarrow 2(HCO_3^-) + Me^{2+} \quad (1)$$

La mise en solution du CO_2 et la dissolution du calcaire qui s'en suit entraînent la formation d'espèces carbonatées dissoutes (HCO_3^-, CO_3^{2-} et H_2CO_3) dont la somme constitue le Carbone Minérale Total Dissous (CMTD). Il est important de noter que la dissolution du CO_2 dans la phase aqueuse et donc son équilibration avec les ions HCO_3^- est très rapide, de l'ordre de 100 secondes selon Dreybrodt (1997).

Le terme H_2CO_3 regroupe en réalité les espèces H_2CO_3* et $CO2_{aqueux}$ (ou dissous) comme l'indiquent Appelo et Postma (2005) qui précisent que la forme H_2CO_3* est très minoritaire par rapport au $CO2_{aqueux}$ à 25°C. Nous considérerons donc le terme H_2CO_3 comme égal au $CO2_{aqueux}$ pour nos calculs. De plus, le modèle théorique utilisé au cours de ces travaux est celui du modèle dit ouvert : l'eau est en interaction avec l'atmosphère dont on peut considérer le volume comme infini par rapport à celui de la phase aqueuse. Le pH des eaux naturelles en contexte karstique étant compris entre 6,5 et 8, la forme $HCO3^-$ est donc prédominante par rapport aux autres espèces carbonatées comme le montre Stum et Morgan (Figure I-1).

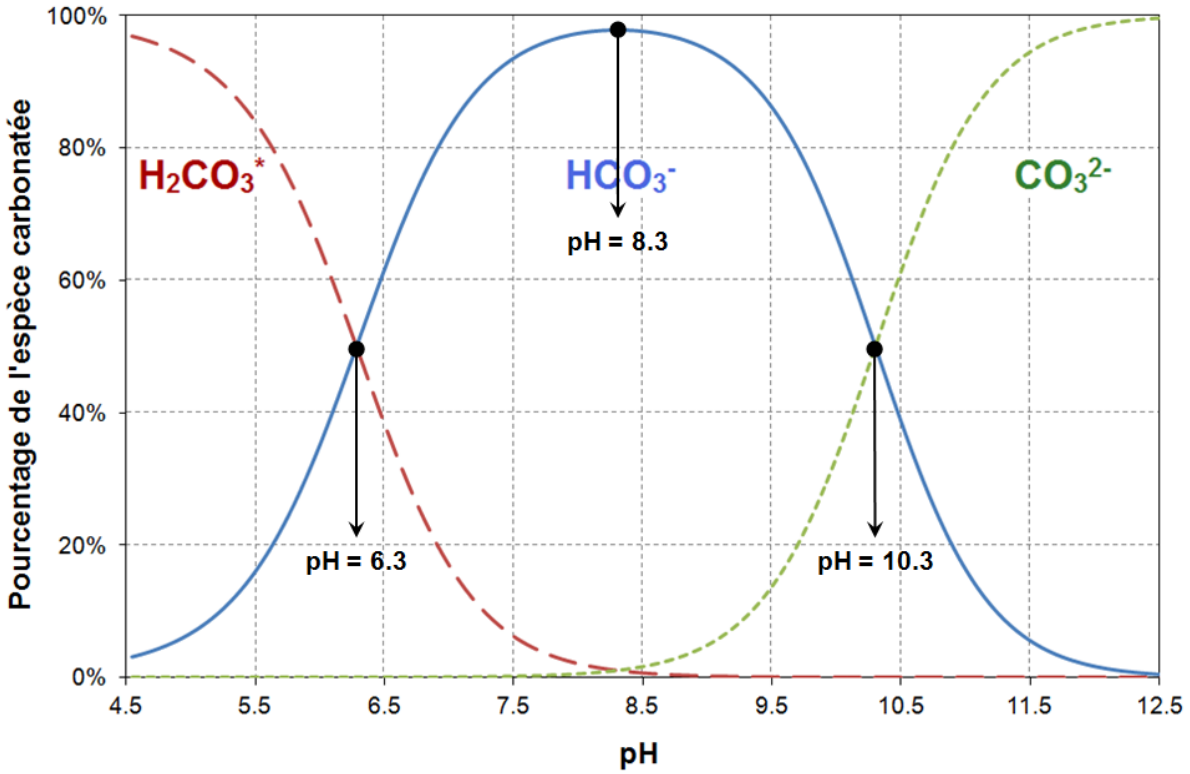


Figure I-1 : Répartition théorique des espèces carbonatées en milieu ouvert à 25 °C (d'après Stum et Morgan, 1981)

L'état d'équilibre de la solution vis-à-vis de la phase gazeuse et solide est décrit communément par deux grandeurs :

- La PCO_2 équilibrante ($PCO2_{éq}$) qui retranscrit l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide,
- L'indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) qui traduit l'état d'équilibre entre la phase aqueuse et la phase solide.

Cependant, la PCO2éq ne traduit pas nécessairement les conditions d'équilibre entre la PCO_2 et la phase solide. En effet, cet état d'équilibre est atteint pour un ISc = 0. Cette PCO_2 présente lors de l'équilibre triphasique est nommée PCO_2 à saturation vis-à-vis de la calcite ($PCO2_{sat}$). La comparaison de ce paramètre avec la $PCO2_{éq}$ de l'eau permet alors de déterminer si cette dernière a subi un dégazage ($PCO2_{eq} < PCO2_{sat}$) ou si elle n'a pas encore consommée tout son potentiel de dissolution des roches carbonatées ($PCO2_{eq} > PCO2_{sat}$). De plus, Peyraube et al., (2012) montrent que ce paramètre permet de remonter à la PCO_2 minimale de l'air avec laquelle l'eau s'est mise à l'équilibre pour acquérir ensuite sa minéralisation. Les auteurs en déduisent ainsi la PCO_2 de l'air présent dans la zone d'écoulement sus-jacente. L'utilisation et le calcul de ces trois paramètres sont présentés au paragraphe V.1.3.1.

Ce processus de karstification rend le système karstique complexe et évolutif, si bien que l'on peut l'opposer au milieu poreux aussi bien par sa structure que par son fonctionnement.

I.1.2 Structure et fonctionnement de la ZNS

Dans cette partie nous présenterons seulement les compartiments faisant partie de la zone non saturée, objet d'étude de ce travail de thèse. Les analyses, interprétations et conclusions seront faite en considérant le karst dans son entièreté.

Le karst s'organise donc verticalement selon deux grandes zones :

- La zone non saturée (ZNS) caractérisée par des écoulements diphasiques. Elle est le siège de cavité aérée dont certaines sont pénétrables comme c'est le cas de la Grotte de Lascaux,
- La zone saturée (ZS) aussi appelée zone noyée dans laquelle l'ensemble des vides et cavités sont remplies d'eau et sont donc difficilement visitable.

L'interface entre ces deux ensembles est mobile et une surface libre peut être observée dans le cas d'un aquifère karstique non captif. La ZNS peut être divisée en plusieurs compartiments spécifiques que sont le sol, l'épikarst et la zone de transmission (Figure I-2).

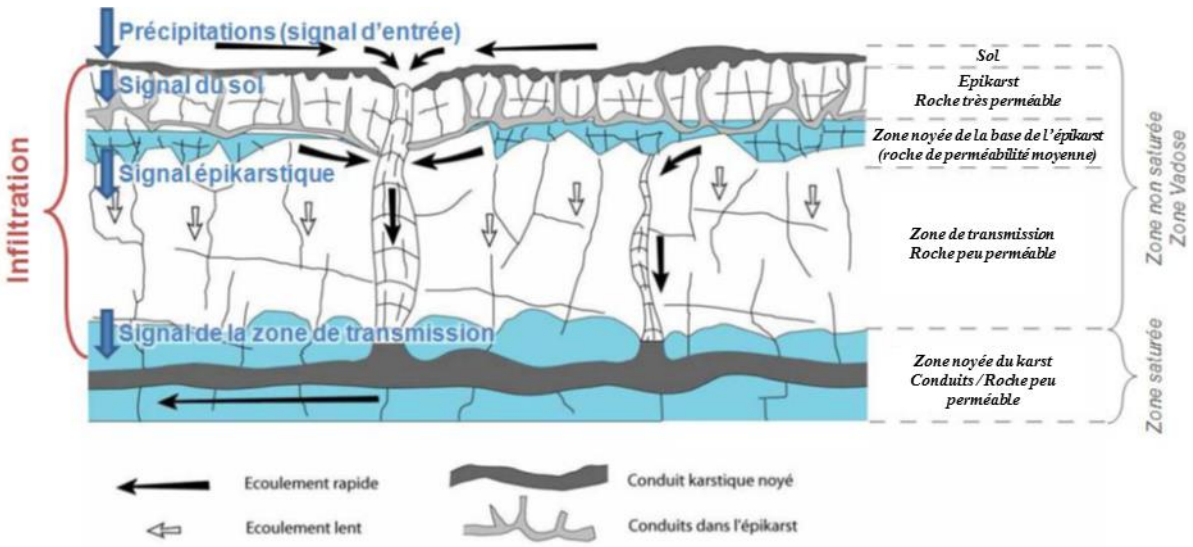


Figure I-2: Structure des écoulements au sein d'un système karstique avec indication des signaux en sortie de chaque compartiment (modifié d'après Charmoille 2003, modifié d'après Smart et Friedrich, 1986).

I.1.2.1 Le sol

Le sol peut être défini comme un système complexe, hétérogène par sa structure (constituée d'agrégats de différentes tailles et de différentes compositions) et par sa constitution (une phase solide composée de matière organique et minérale, une phase liquide contenant ions et

composés dissouts et une phase gazeuse). Il contient de la matière organique morte, de la matière minérale mais aussi de la matière organique vivante : les microorganismes décomposeurs, la macrofaune (larves, fourmis, lombrics..), la microfaune (minuscules organismes qui vivent dans l'eau du sol) et les racines.

Du point de vue de l'hydrogéologie karstique, le sol ne fait pas partie de l'aquifère karstique, il lui est cependant associé en tant que lieu de production du CO_2 nécessaire à la karstification. Klimchouk (2004) estime que le sol se met en place aux premières étapes du développement du karst et joue un rôle important dans le fonctionnement de ce dernier. Dans des stades ultérieurs, le sol peut être érodé par l'entraînement des particules fines dans le réseau de drainage, ce qui aboutit aux paysages de karst nus (lapiaz).

En plus de contribuer à l'enrichissement de l'eau en CO_2, le sol permet un stockage de l'eau dans sa porosité matricielle et ainsi assure une fonction de mélange entre des eaux préexistantes et des eaux nouvelles apportées par les précipitations (Perrin et al. 2003, Williams 2008). Le sol peut donc impacter fortement le signal géochimique des eaux pendant les épisodes de crue. En effet, les eaux préalablement stockées dans le sol vont participer à l'écoulement et engendrer une modification de la chimie de ce dernier à l'exutoire (Vesper et White 2004). Hors des périodes de crues, Liu et al., (2007) mettent en lumière une relation entre la teneur en CO_2 de l'eau et l'activité bactérienne, source de CO_2 gazeux dans les sols. Ce compartiment considéré comme indépendant du système karstique fera donc l'objet de toute notre attention tant ce dernier peut influer sur le marquage géochimique des eaux, mais aussi sur la dynamique des écoulements dans la zone vadose.

I.1.2.2 L'épikarst

L'épikarst est la zone la plus superficielle de l'aquifère karstique. Elle est située en contact avec le sol lorsque ce dernier existe. Cette localisation lui vaut le nom de « subcutaneous zone », en anglais (Williams 2008). La formation de l'épikarst est due à la décompression mécanique des roches carbonatées, par décharge lithostatique. A ce mécanisme viennent s'additionner les processus de pédogenèse et de karstification. L'épaisseur de cette zone dépend fortement du système considéré et des paramètres influant sur le développement de l'épikarst. En effet, bien qu'il s'agisse d'une zone superficielle, la profondeur de l'épikarst varie généralement de 3 à 15 mètres (Klimchouk 2004) dans les contextes analogues à celui de la Grotte de Lascaux.

A l'instar du sol, l'épikarst est une zone de stockage et de transmission de l'eau (Mangin 1975, Perrin *et al.* 2003, Lopez, 2009). Ces caractéristiques lui sont conférées par une porosité secondaire élevée (entre 10 et 30 %) et une forte perméabilité (Williams 2008). Celle-ci diminue en fonction de la profondeur (Smart et Friederich 1986). Il en résulte un fort contraste de perméabilité avec la zone de transmission sous-jacente permettant la mise en place d'une nappe épikarstique (Figure I-3). De par sa morphologie, il est d'usage de diviser les écoulements au sein de l'épikarst en deux grandes classes : les écoulements rapides (circulant au sein des fractures et des conduits) et les écoulements lents (identifiés au niveau de la porosité matricielle et des fissures du système). Williams (2008) note par traçage artificiel que les écoulements dans l'épikarst se font avec une composante verticale mais aussi une composante horizontale. Ainsi, le signal d'entrée par infiltration diffuse dans l'épikarst se retrouve concentré et dirigé préférentiellement par un drainage naturel vers des zones de sortie ponctuelles au niveau des fractures présentes dans les compartiments sous-jacents. Ces différentes modalités de circulation des eaux engendrent des contributions des eaux de l'épikarst pouvant aller jusqu'à 50 % de l'écoulement total à la sortie du système (Mangin 1975, Perrin *et al.* 2003, Trcek 2007, Lopez 2009). Lastennet (1994) et Emblanch (1997) montrent que même en période de basses eaux, la zone non saturée participe à l'écoulement à l'exutoire. Les temps de transfert de chacune des composantes (rapides ou lentes) sont évidemment intimement liés à l'épikarst étudié.

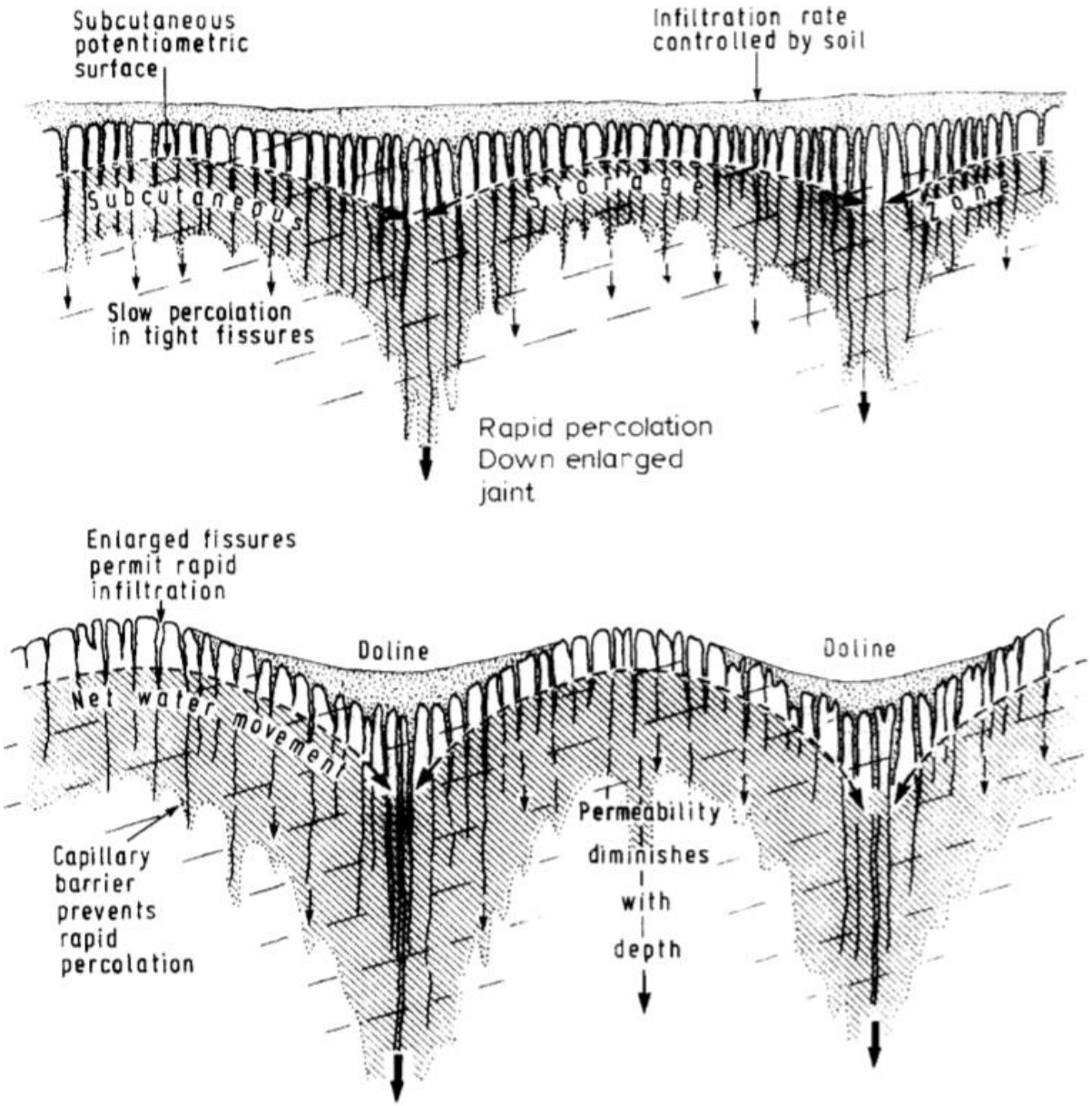


Figure I-3 : Représentation conceptuelle de l'épikarst selon Williams (1988).

Du fait de sa proximité avec le sol, l'épikarst subit les influences des processus biogéochimiques (Mudry, 1987). Ainsi, les eaux contenues dans l'épikarst peuvent être fortement minéralisées et présenter des teneurs en CO_2 importantes (Peyraube *et al.* 2012, 2014). Il s'agit donc d'un site privilégié pour la mise en solution de la calcite. Cette dissolution s'avère rapide : Ford et Williams (2007) estiment que la majorité de la dissolution de calcite s'effectue dans les 10 premiers mètres de l'épikarst lorsque ce dernier est développé.

I.1.2.3 La zone de transmission

La partie sous-jacente à l'épikarst est nommée zone d'infiltration ou zone de transmission selon le lexique français ou anglais. Cependant, le terme de transmission semble mieux adapté tant le rôle premier de ce compartiment est de transmettre les écoulements vers la zone saturée.

Ces derniers ont une composante verticale majoritaire et s'établissent à travers les zones de fracturation à forte perméabilité, mais aussi dans des réseaux de fissures plus étroites. Deux modalités d'écoulement sont donc présentes dans ce compartiment :

- Les écoulements directs à travers les fractures drainantes voire les conduits aérés selon le degré de karstification du massif,
- Les écoulements retardés à travers les réseaux de fissures et/ou les joints stratigraphiques.

On voit ainsi poindre l'importance de déterminer quel type d'écoulement est majoritaire dans le système étudié tant ce dernier aura un impact sur le chimisme des eaux et les modalités de recharge de l'aquifère karstique de zone noyée. En effet, Lastennet et Mudry (1997), Mudarra et al., (2011) ont montré que les arrivés d'eau à faible temps de séjour provenant de l'épikarst peuvent être distinguées par une augmentation des concentrations en chlorures. Savoy et al., (2011) mettent quant à eux en lumière une augmentation de la teneur en HCO_3^-, tout comme Lastennet (1994) et Minvielle (2015) pour le système de Notre Dame des Anges.

Dans le cadre d'un aquifère karstique fortement hiérarchisé avec un épikarst et une zone de transmission, celle-ci peut jouer un rôle capacitif. Lastennet (1994), Emblanch et al. (2003) observent qu'une partie non négligeable des écoulements à l'exutoire peut venir de réserves présentes dans la zone de transmission et participer à l'écoulement aussi bien en période de crue qu'à l'étiage. Certaines de ces réserves fonctionnent en trop plein et peuvent, sous de fortes sollicitations pluvieuses, s'activer et libérer des eaux à long temps de séjour reconnaissable à leur plus forte minéralisation. A contrario, ces écoulements peuvent être pérennes comme Lopez (2009) l'a montré pour le système karstique de la colline de Lascaux avec la nappe perchée de la Haute Fageotte, ou encore (Peyraube et al., 2012) pour le système karstique de Cussac (Dordogne, France) ou encore la rivière d'Albion, écoulement de la zone non saturée du système de Fontaine de Vaucluse.

I.2 Objet de l'étude : la grotte de Lascaux

Avant d'aborder en détails les problématiques abordées au cours de ces travaux de thèse, il apparait comme primordial de présenter le patrimoine archéologique exceptionnel qu'elle renferme ainsi que l'historique des faits marquants depuis sa découverte jusqu'à nos jours, puisque de ceux-ci découlent en grande partie certaines problématiques abordées au cours de cette étude.

I.2.1 Patrimoine archéologique de la grotte de Lascaux

La grotte de Lascaux a été découverte le 12 septembre 1940 par Jacques Marsal, Georges Agniel, Simon Coëncas et Marcel Ravidat. L'authentification des œuvres par l'abbé Henri Breuil, dans la même année, conduit à sa classification au titre des monuments historiques (Breuil, 1941) et plus tardivement au patrimoine mondial de l'Unesco. Le bestiaire représenté dans la cavité se compose 1963 figures enregistres parmi lesquelles le cheval, le cerf, l'auroch et le bouquetin dominent. Un seul ours noir difficile à discerner dans le large aplat noir du ventre du troisième taureau de la salle du même nom. Des félins peu nombreux se situent principalement dans le Diverticule des Félins ou Cabinet des Félins. La Figure I-4 présente une photographie de la Salle des Taureaux, zone regroupant les représentations animales les plus connues de la cavité.

Figure I-4: Vue panoramique du panneau de la Licorne dans la salle des Taureaux (Cl. Aujoulat).

La cavité compte également une célèbre représentation anthropomorphe, localisée dans le puits. Cette grotte se singularise également par l'utilisation, à côté du dessin et de la gravure, de la technique de la peinture (Aujoulat, 2004). Les premières propositions chronologiques s'appuient sur des données stylistiques. Pour Breuil (1952) et Peyrony (1949), les œuvres devaient être rattachées au Périgordien tandis que pour A. Leroi-Gourhan (1965) elles devaient l'être au Solutréen. L'étude du mobilier récolté par l'abbé Glory, pendant les travaux de mise en place du système de régénération de l'atmosphère dans le vestibule de la cavité en 1957-1958 ainsi qu'à l'occasion des fouilles qu'il effectua dans le Puits en 1961-1962, conduisit Leroi-Gourhan et J. Allain à rattacher la grotte de Lascaux au Magdalénien II (Leroi-Gourhan & Allain, 1979). Les premières datations radiocarbones de charbons de bois provenant des fouilles de l'abbé Breuil et d'André Glory dans le Passage (-16 000 ± 500 BP) et le Puits (-17 190 ± 140 BP) confirmèrent l'attribution du mobilier à une période ancienne du Magdalénien (Leroi-Gourhan & Evin, 1979). Mais une nouvelle datation proposant une date plus ancienne - 18 600 ± 190BP (GIF A 95582), réalisées plus récemment à partir de fragments de bois de renne, tendraient à vieillir cette estimation et à rapporter le matériel à la charnière Solutréen-Magdalénien (Aujoulat et al., 1998).

I.2.2 De la découverte à la protection de la Grotte de Lascaux

Depuis la découverte de la grotte, deux phases principales concernant la conservation de ce bien culturel se sont succédées : l'une de 1947 à 1963, a été dominée globalement par la volonté d'adapter la grotte à la visite ; l'autre, de 1963 à nos jours, est caractérisée par l'approche scientifique des problèmes, la conservation du monument devenant la priorité.

I.2.2.1 De 1940 à 1963 : adaptation de la grotte aux visites

Dès l'été 1940, la cavité subit des aménagements majoritairement cantonnés à son point d'entrée. Le surplomb rocheux à l'entrée est partiellement éboulé et un important cône d'éboulis s'est formé. Le climat du Quaternaire, caractérisé par des phases tempérées succédant ou précédant des phases froides, a été favorable à l'altération mécanique de la voûte calcaire se traduisant par des effondrements. Un premier décapage du cône d'éboulis est donc entrepris et permet l'aménagement de l'escalier extérieur pour descendre dans la cavité, et d'un porche d'entrée. Les modifications apportées au site sont déjà importantes ; cependant par mesure de sauvegarde le propriétaire fait clore par un mur la salle des taureaux. De même une porte monumentale en bronze est mise en place pour isoler la cavité de l'extérieur. Le 14 Juillet 1948, la cavité est officiellement ouverte au public. S'en suit une période au cours de laquelle la fréquentation augmente fortement pour dépasser les estimations d'affluence. Cette période marque l'apparition des premières perturbations importantes des supports ornées avec l'observation en 1955 de coulures colorées. Ces suintements d'eau de condensation, conséquences du réchauffement de l'air et de l'apport d'humidité par les visiteurs mobilisent les pigments de la peinture de la vache rouge (Salle des Taureaux). Pour contrer ce phénomène de condensation ainsi que pour améliorer le ressenti des visiteurs, une machinerie de recyclage de l'air (filtration des poussières, refroidissement de l'air) est implantée dans la zone d'entrée entrainant de ce fait une diminution du volume de l'éboulis. Les variations saisonnières des températures sont alors importantes dans la cavité du fait de l'ablation de cet éboulis qui garantissait une isolation vis-à-vis de l'extérieur. Le but à atteindre était de parer aux perturbations apportées par la présence permanente de soixante occupants par heure, seuil largement dépassé. En fait, la grotte pouvait recevoir le maximum de visiteurs autorisé par sa géométrie et les impératifs de surveillance. Ainsi au cours de l'année 1960 c'est près de 100 000 visiteurs qui ont pu avoir accès à la grotte de Lascaux. Mais très rapidement les strictes consignes initiales de fonctionnement de cette machinerie ne sont plus respectées. Toutes les conditions étaient réunies peu à peu pour déboucher sur la première crise biologique provoquée par la croissance d'algues vertes dans la cavité, « la maladie verte ». Des traitements sont alors entrepris dans la cavité et le Ministre des Affaires Culturelles décide la fermeture de la grotte

aux visiteurs. Dans la foulée, une première commission scientifique est instaurée avec comme but premier de comprendre les phénomènes ayant conduit à cette maladie verte. Ces conclusions sont bien résumées par M. Guyon (membre de la Commission) :

« La décision de fermeture de la cavité le 20 Mars 1963, par André Malraux, alors Ministre des Affaires Culturelles, était imposée par le développement rapide et incontrôlé d'algues sur les parois peintes. Cette "maladie verte", qui a depuis été guérie, était la conséquence de la pollution provoquée par un afflux trop grand de visiteurs et un système inadéquat de conditionnement de l'air. »

I.2.2.2 De 1963 à nos jours : priorité à la conservation du monument

Suite à cette première crise et malgré la fermeture de la cavité, les membres de la Commission sont confrontés à des précipitations de calcite sous différents aspects morphologiques : voiles, aiguilles, cristaux polymorphes et des corrosions ou attaques de la couche de calcite servant de support aux peintures. Ces effets semblaient se produire de façon anarchique dans toutes les parties de la grotte. On appela cela la “maladie blanche”. Ainsi en plus du problème biologique se posait le problème physico chimique de l'équilibre aux parois du carbonate de calcium. Celui-ci paraissait d'autant plus ardu que chaque zone de la paroi peinte semblait avoir un comportement différent. Afin d'établir un plan de sauvegarde, la Commission scientifique et technique de la Grotte de Lascaux associait alors à ses travaux des spécialistes de diverses disciplines : Chimie, Physique et Géologie. Il fallait avant tout définir les paramètres physiques qui influençaient directement ou indirectement l'équilibre du carbonate de calcium sur les parois décorées, et mettre au point une méthode d'observation. Ce point représente l’élément déclencheur qui permit le passage à une philosophie de conservation basée sur la compréhension des phénomènes intra et extra cavitaires pouvant affecter les parois ornées. Les conclusions s’orientèrent rapidement vers la préconisation suivante : retrouver la constance des paramètres microclimatiques (température et hygrométrie). En parallèle, un débat s’ouvrit rapidement autour de la question des teneurs en CO_2 de l’atmosphère de la cavité, paramètre prépondérant dans les équilibres calco-carboniques des eaux aux parois. Le professeur Schoeller (1965) proposa dans son rapport deux solutions :

- Supprimer complètement les suintements d’eau dans la cavité ce qui impose en parallèle de maîtriser l’hygrométrie pour empêcher une condensation trop importante, mais aussi de contrer les arrivées de CO_2 dans la cavité,

- Maitriser l'hygrométrie et laisser les suintements dans la grotte, ce qui nécessite de ne pas abaisser le taux de CO_2 naturel de l'air de la cavité pour éviter la précipitation de calcite sur les parois.

La Commission Scientifique opta alors pour une solution alliant les deux propositions à savoir, installer une machinerie de conditionnement de l'air pour maitriser l'hygrométrie des parois et extraire l'air pour abaisser les teneurs en CO_2 dans la cavité, sans pour autant supprimer les suintements dans la cavité (solution techniquement infaisable). A ce jour, les raisons de cette prise de décision contraire aux recommandations de Schoëller ne sont pas connues. Malgré tout, l'extraction fut mise en place au cours de l'année 1965 dans les différentes parties de la cavité avant d'être ensuite cantonnée au seul Puits du Sorcier. Depuis ce jour, ce dispositif a été modernisé à plusieurs reprises mais aucune étude n'a permis de déterminer l'impact réel de cet extracteur d'air sur les paramètres microclimatiques et l'impact des eaux de condensation et de suintement aux parois. À partir de 1970, les suivis journaliers des paramètres (température, humidité, teneur en CO_2, etc.) commencent à l'intérieur de la grotte suite aux recommandations de la Commission Scientifique. S'ensuit une période sans perturbations notables pour la cavité. Une deuxième génération de machines, dédiées à conditionner l'air, est installée, de 1989 à 1992, pour remplacer la première. En 2000, une troisième machinerie plus moderne vient remplacer la seconde. Cette dernière a été depuis ce temps modernisée. Une deuxième crise biologique apparait au cours de l'année 2001. En Juillet, des moisissures blanches formées de filaments et duvets se développèrent rapidement sur les banquettes de la Salle des Taureaux pour y atteindre ensuite les voûtes et parois. Elles sont attribuées à une souche de champignon typique des terres agricoles, le Fusarium Solani. Le traitement appliqué sous le contrôle du Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) consista en la pulvérisation de biocide et l'épandage de chaux vive sur les sols. Devant la complexité des problèmes soulevés et les difficultés rencontrées, le Ministère de la Culture instaura en 2002 un Comité scientifique international, consacré à orienter les travaux de recherches à travers un plan global de conservation. Plusieurs actions prioritaires sont alors mises en place pour analyser les causes du phénomène de 2001, parmi lesquelles la réalisation d'un constat d'état, le relevé 3D de la cavité mais aussi l'étude des eaux et de l'aérologie de la cavité de Lascaux. Cette étude hydrogéologique est confiée au Centre d'étude des Géosciences Appliquées de l'Université de Bordeaux (CDGA) et se concrétise par les résultats de la thèse de doctorat de Lopez (2009). Entre temps, de nouvelles perturbations sont relevées dans la cavité avec l'apparition de taches noires dans certaines zones de la cavité. Ces dernières sont immédiatement traitées ponctuellement par pulvérisation de biocide. En 2010, un nouveau Conseil Scientifique présidé par M. Yves Coppens est instauré par le Ministre de la Culture et

de la Communication. Ses missions consistent à proposer les programmes de recherche nécessaires à la compréhension des désordres constatés ainsi que des solutions permettant de conserver l'intégrité des œuvres de la Grotte de Lascaux. C'est dans ce cadre que le Laboratoire I2M a été sollicité pour répondre aux questions concernant la dynamique du CO_2 dans la cavité et dans le massif ainsi que l'équilibre des eaux de condensation et d'exfiltration aux parois de la cavité de Lascaux. En parallèle, il est demandé de déterminer l'impact de l'extraction de l'air toujours active sur ces deux problématiques.

I.3 Problématiques de l'étude

L'étude réalisée dans le cadre de ces travaux de thèse se veut à la fois systémique mais aussi détaillée pour comprendre les mécanismes siégeant dans l'environnement karstique de la cavité et leurs potentiels impacts sur cette dernière. En effet, le caractère complexe du milieu karstique ainsi que les multitudes d'interrelations entre les différentes composantes du milieu souterrain (solide, liquide, gaz, faune et flore) rendent son analyse difficile et imposent de replacer nos réflexions dans l'intégralité du système avant de nous concentrer sur la cavité et d'appliquer les connaissances engrangées aux problématiques de conservation proprement dites. Les deux parties suivantes ont donc pour objet d'introduire plus en détails les objectifs de recherche pure ainsi que les objectifs de recherche appliqués à la conservation de la cavité de Lascaux tout en présentant l'intérêt d'étudier l'environnement karstique de la cavité de Lascaux en particulier.

I.3.1 Objectifs de recherche

Les attentes scientifiques concernant l'étude du karst reposent aujourd'hui en partie sur la compréhension du fonctionnement hydrodynamique et hydrogéochimique des systèmes karstiques, notamment dans l'épikarst et la zone non saturée. Il est donc primordial de comprendre quels sont les différents types d'eaux qui transitent dans le karst, le moment où chacun de ces types d'eaux participe à l'écoulement à l'exutoire du système et ce dans le but de déterminer des temps de transfert mais aussi de mieux apprécier la vulnérabilité de la ressource en eau. En parallèle, la compréhension des mécanismes responsables de l'acquisition du signal chimique des eaux transitant ensuite à travers le milieu karstique jusqu'à l'exutoire revêt une importance capitale pour l'exploitation, la gestion et la protection des ressources en eau des systèmes karstiques.

Au cours de ces travaux de thèse, deux objectifs de recherche principaux sont donc traités en détails :

- Déterminer la dynamique du dioxyde de carbone dans la zone vadose du karst, principale responsable de l'acquisition par les eaux d'infiltration de leur signal géochimique,
- Comprendre les conditions et modalités d'écoulement dans la zone vadose du karst, responsables du comportement hydrodynamique et hydrogéochimique des eaux transitant vers la zone noyée de l'aquifère karstique.

I.3.1.1 La dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst

Depuis la fin du XX^{ème} siècle, un intérêt grandissant se fait sentir pour la compréhension de la dynamique du CO_2 dans cette zone du système karstique, que ce soit du point de vue de l'étude des transferts de CO_2 naturel ou anthropique (stockage profond du CO_2) mais aussi de la détermination du potentiel de karstification des eaux d'infiltration, principal facteur impactant le chimisme des eaux de la zone vadose. Sur le site d'étude, de fortes teneurs en CO_2 (de 5 à 8 %) sont régulièrement relevées dans l'air de certaines parties les plus profondes de la Grotte de Lascaux (Vouvé, 1968 ; Denis et al., 2005 ; Lopez, 2009). Ces valeurs élevées ne font pas exception, en effet des teneurs en CO_2 importantes sont observées dans diverses cavités de la région comme celle de Cussac (Peyraube, 2012) ou dans d'autres cavités karstiques françaises comme celles de Chauvet (Mangin et al., 1999) de l'Aven d'Orgnac (Bourges et al., 2006), ou encore des Grandes Combes (Batiot-Guilhe et al., 2007). Ces concentrations élevées posent question. En effet, comment expliquer que des teneurs si importantes soient relevées dans les cavités alors que la zone de production, en l'occurrence le sol, ne semble pas être à l'origine de telles concentrations ? Un début de réponse avait été apporté par Benavente et al., (2010) qui retrouvaient des concentrations analogues dans la zone vadose de la cavité de la Nerja ou encore Lopez (2009) qui relevait ponctuellement des teneurs en CO_2 analogues dans les formations détritiques sablo-argileuses associées à l'épikarst de la cavité de Lascaux. Plus récemment, Peyraube et al. (2012) démontrent par l'intermédiaire des équilibres calco-carboniques des eaux que la teneur en CO_2 rencontrée par les eaux au cours de leur infiltration dans la zone vadose, facteur responsable de leur minéralisation carbonatée, peut atteindre plus de 5%. Cependant, aucun mécanisme pouvant être à l'origine de ces teneurs en CO_2 élevées n'a pu être démontré par ces auteurs. En effet, le manque de mesures in-situ des paramètres hydroclimatiques (température, teneur en eau, pression) ainsi que le protocole de mesure des PCO_2 n'ont pas permis de statuer sur ces mécanismes. Ces travaux de thèse s'attacheront donc

à comprendre les modalités d'écoulement, la dynamique du CO_2 dans la zone vadose et son impact sur le marquage géochimique des eaux dans le système karstique de la cavité de Lascaux.

I.3.1.2 Les conditions et modalités d'écoulement dans la zone vadose du karst

Le massif karstique de la grotte de Lascaux est un environnement privilégié pour l'étude des modalités et des conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst. Sa faible dimension permet d'en avoir une vision globale. Ce site, présenté en détail dans les parties suivantes, est constitué d'une colline de faible dimension (environ 1 km²), assimilable à une bute témoin de calcaires coniaciens et santoniens karstifiés et dont les reliefs sont comblés par des formations détritiques sablo-argileuses. L'organisation géométrique d'un tel massif est complexe. On y différencie trois compartiments, aux propriétés lithologiques, hydrodynamiques et hydrogéochimiques bien différentes, susceptibles d'intervenir dans la conduite des écoulements hydriques et gazeux. On distingue en effet le sol pédologique, les formations carbonatées karstifiées ainsi que les formations détritiques autochtones (altérites de fantômisation) ou allochtones (altérites de remplissage ou de recouvrement récent). Cet ensemble dessine la partie haute du système karstique de Lascaux et compose les premiers mètres de l'infiltration. C'est dans ces compartiments superficiels que les eaux d'infiltration acquièrent leur minéralisation sous l'impact du dioxyde de carbone, principal moteur du processus de karstification.

La cavité ornée de Lascaux, située en subsurface à une profondeur variant entre 5 à 25 m, offre dès lors une fenêtre d'observation privilégiée sur les circulations d'eau à la sortie de l'épikarst. En effet, de nombreuses manifestations hydriques sont observées en divers endroits de la grotte, chaque écoulement possédant une dynamique qui lui est propre. La cavité, qui a pour origine des conditions de circulations antérieures à celles qui existent aujourd'hui, peut recouper les fissures et les fractures ou s'effectue le ruissellement comme le montre la Figure I-6. Il apparaît alors un écoulement dont la durée, la fréquence et l'intensité sont liées à la pluviosité et aux conditions d'écoulement dans le massif. En parallèle, des écoulements lents pouvant être assimilés à des exfiltrations, sont reconnus aux joints stratigraphiques situés dans la zone peu profonde de la cavité. Ces écoulements ont une durée variable selon les années et apparaissent avec un retard conséquent par rapport aux sollicitations pluvieuses et aux réponses observées dans les autres parties de la Grotte de Lascaux (3 à 5 mois d'après Vouvé, 1968).

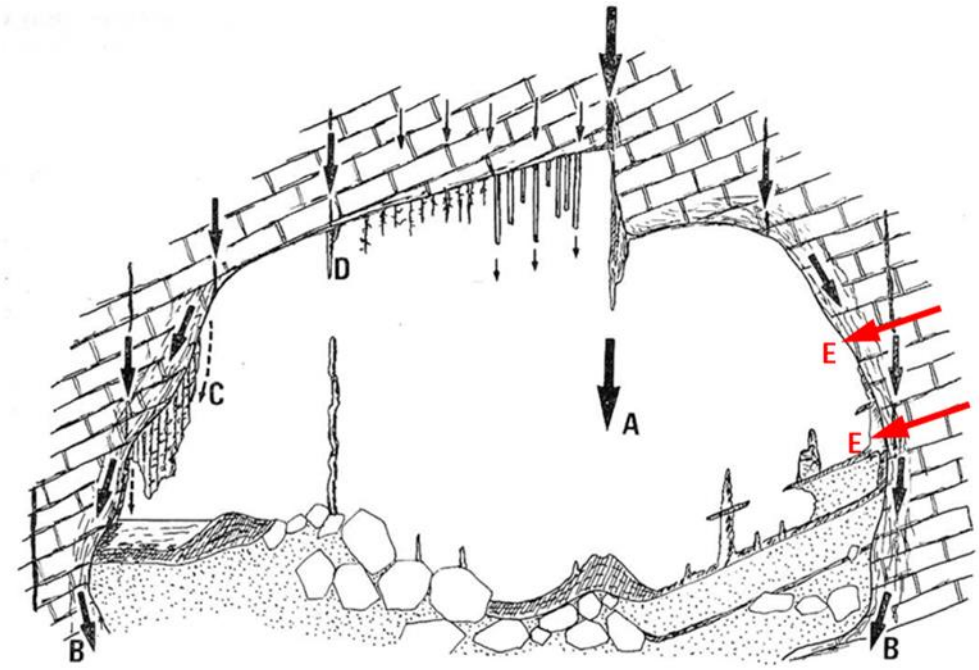


Figure I-5: Représentation schématique des circulations d'eau recoupées par une cavité située dans la zone de transmission. A : Infiltration rapide à travers les fractures et fissures ouvertes. B : Ecoulements autour des parois dans la zone finement poreuse. C : Suintements voir ruissellement lorsque le milieu poreux entourant la cavité est saturé. D : Arrivée d'une eau d'infiltration retardée lorsqu'il n'existe pas ou peu de milieu poreux autour de la paroi. E : Exfiltrations par les joints stratigraphiques situés entre les bancs de calcaire recoupés par la cavité (modifiée selon Mangin, 1975).

Une autre émergence située dans la zone de transmission est aussi reconnue sur le versant nord de la colline de Lascaux : la source de la Haute Fageotte. Cet écoulement pérenne provient d'une nappe perchée au-dessus du niveau de base local. L'étude détaillée de ces différents types d'écoulement de la zone vadose du karst doit permettre de mieux apprécier les mécanismes à l'origine de l'acquisition du signal géochimique des eaux de la zone de transmission ainsi que les modalités d'écoulement vers les zones plus profondes. Parallèlement, des questionnements connexes à ces objectifs de recherche sont traités du point de vue de la conservation de la cavité de Lascaux.

I.3.2 Objectifs de recherche appliqués à la conservation de la Grotte de Lascaux

La DRAC Aquitaine, Direction Régionale des Affaires Culturelles et le laboratoire de l'Université Bordeaux, I2M, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (anciennement GHYMAC, Géosciences-Hydrosciences-Matériaux-Construction et CDGA, Centre de Développement des Géosciences Appliquées), ont établi une longue collaboration, relative à la conservation des grottes ornées dans le Sud-Ouest de la France. En attestent les différents travaux de thèse réalisés depuis le début des années 2000 : Ferchal (2003), Lopez (2009), Peyraube (2012), Xu (2015) et Minvielle (2015). En continuité de ces travaux, une nouvelle collaboration a vu le

jour en 2013, suite à un appel d'offre négocié émis par la DRAC Aquitaine, portant sur des axes de recherches à finalité conservatoire proposés par le Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux. Cette étude est conduite dans l'objectif d'une meilleure connaissance des processus ayant pour siège l'environnement de la grotte et la grotte en elle-même, et qui peuvent avoir un impact sur la conservation des parois ornées de la Grotte de Lascaux. Cet environnement fragile, du fait des équilibres ténus qui préservent la grotte, est soumis à des sollicitations anthropiques et à des contraintes naturelles d'ordre climatique, biologique ou physico-chimique. Afin de mieux comprendre et apprécier l'influence de ces perturbations à court et long terme, il est nécessaire de mettre à profit les connaissances acquises dans le domaine de la recherche.

Ces travaux de thèse s'attacheront donc à :

- Déterminer en détails la dynamique du CO_2 ainsi que l'aérologie de la cavité de Lascaux,
- Estimer les phénomènes mettant en jeu l'équilibre des eaux présentes aux parois de la cavité de Lascaux, à savoir la précipitation et la dissolution de la calcite,
- Comprendre l(es)'impact(s) potentiel(s) de l'extraction de l'air de la cavité sur l'aérologie et donc les équilibres des eaux aux parois.

Pour atteindre ces objectifs, les phénomènes en eux-mêmes et les paramètres les influençant doivent être étudiés de manière conjointe.

I.3.2.1 La dynamique du CO_2 et l'aérologie de la cavité de Lascaux

En premier lieu, il parait donc essentiel de se pencher sur la dynamique du CO_2 à l'intérieur de la cavité tant ce gaz est un paramètre clé dans l'évolution de la calcite sur les parois ornées. De plus, le phénomène de condensation étant principalement influencé par l'humidité de l'air et les différences de température entre l'air et la roche, il convient de s'intéresser en détail aux mécanismes responsables de la répartition spatio-temporelle des températures dans la cavité. Généralement, les teneurs en CO_2 dans l'atmosphère et les températures des cavités sont considérées comme les résultantes des échanges avec l'atmosphère extérieure (pauvre en CO_2), et des flux thermiques et de CO_2 venant du massif calcaire. Cependant, un facteur est souvent négligé dans les études menées dans ce domaine : l'aérologie interne de la cavité et les paramètres la contrôlant. En effet, la répartition spatio-temporelle du CO_2 et des températures peut être affectée par les mouvements d'air présents à l'intérieur de la cavité. Ceci implique donc de se pencher sur ces phénomènes aérologiques de façon beaucoup plus précise. Les informations recueillies sur la dynamique du CO_2 dans la zone vadose et la cavité de Lascaux,

ainsi que sur l'aérologie de la cavité nous permettrons de mieux apprécier les périodes de l'année ainsi que les zones de la cavité potentiellement les plus sensibles aux processus affectant la calcite sur les parois ornées.

I.3.2.2 Les équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux

Le but principal du conservateur est la préservation de l'état des parois ornées. A ce jour et comme mentionnés précédemment, de nombreux phénomènes naturels et/ou résultants de l'activité humaine ont eu des impacts néfastes sur les parois depuis l'invention de la Grotte de Lascaux :

- Les phénomènes microbiologiques avec la maladie verte et la crise biologique des années 2000. Plusieurs études ont été menées pour comprendre l'occurrence de ces phénomènes depuis les années 50. Actuellement, un programme de recherche microbiologique est en cours sur le site de la cavité de Lascaux.
- Les phénomènes de dissolution de calcite aux parois par les eaux de condensation ou d'infiltration chargées en CO_2 dans le massif sus-jacent et/ou dans la cavité. Ce processus dont on sait qu'il est influencé par des facteurs géochimiques (CO_2, minéralisation de l'eau, etc.) et met en jeu l'équilibre triphasique entre l'air, l'eau et la roche, peut affecter les supports ornés en dissolvant les voiles de calcite recouvrant les peintures (protection naturelle) ou en l'attaquant lui-même.
- Les phénomènes d'assèchement des parois, provoqués par une différence de température en faveur de la roche trop importante. Ce processus est donc principalement influencé par l'aérologie de la cavité et notamment par les échanges avec l'atmosphère extérieure. La résultante principale de ce processus est la desquamation des parois sous formes d'écailles calciques qui menacent alors de se décrocher. Ce processus d'haloclastie est provoqué par la cristallisation de calcite à l'interface entre le recouvrement calcitique et la paroi calcaire. Parallèlement, cet assèchement a pour conséquence indirecte le dépôt de calcite présente auparavant sous forme dissoute dans les eaux à l'équilibre avec les parois, facteur aggravant de la desquamation de la paroi ornée. Ce dépôt sera d'autant plus important que le phénomène de dissolution ayant eu lieu précédemment aura été important (impact du CO_2 de l'air).
- Les phénomènes de précipitation sur les supports ornés, provoqués par la mise à l'équilibre des eaux d'infiltration, fortement chargées en CO_2 et ayant acquis une minéralisation importante au cours de leur transit dans le massif sus-jacent, avec

l'atmosphère de la cavité. Ainsi, plus la différence de teneur en CO_2 est importante entre l'air de la cavité et l'eau, plus la quantité de CO_2 dégazée sera forte et le phénomène de précipitation de calcite sera conséquent. Ce processus peut aussi se produire sous l'effet de l'assèchement des parois qui provoque une sursaturation des eaux vis-à-vis de la calcite et donc une rééquilibration par précipitation de carbonate de calcium. Ces processus de précipitation de calcite ont déjà été fortement mis en jeu dans la cavité. Ils sont en effet à l'origine de la maladie blanche mentionnée précédemment.

- Plus récemment, des vermiculations sont observées sur les parois de la cavité (en particulier dans la Salle des Taureaux). Ces entités millimétriques à centimétriques se forment suite à la mobilisation et à l'agrégation des matières fines présentes sur la paroi (poussières, argiles, pigments, *etc.*). Les facteurs influençant la formation de ces vermiculations ne sont que peu connus (microbiologie, microclimatologie, eau, géochimie, support, *etc.*), c'est pourquoi une étude scientifique est en cours depuis 2014.

Au cours de cette thèse, les phénomènes de dissolution et de précipitation de calcite aux parois par les eaux de condensation et d'exfiltration sont étudiés. Les autres processus font l'objet d'études par d'autres équipes scientifiques. Pour tenter de quantifier les impacts potentiels des phénomènes de dissolution et de précipitation de calcite, mettant en jeu aussi bien la composition chimique de l'atmosphère de la cavité, son aérologie ainsi que la géochimie des eaux présentes aux parois de la cavité, il s'avère nécessaire de mettre en application les connaissances acquises au cours du suivi géochimique des eaux de la zone vadose du karst de la colline de Lascaux. La Figure I-6 présente un schéma conceptuel des paramètres mis en jeu dans les processus affectant la calcite aux parois ornées de la Grotte de Lascaux.

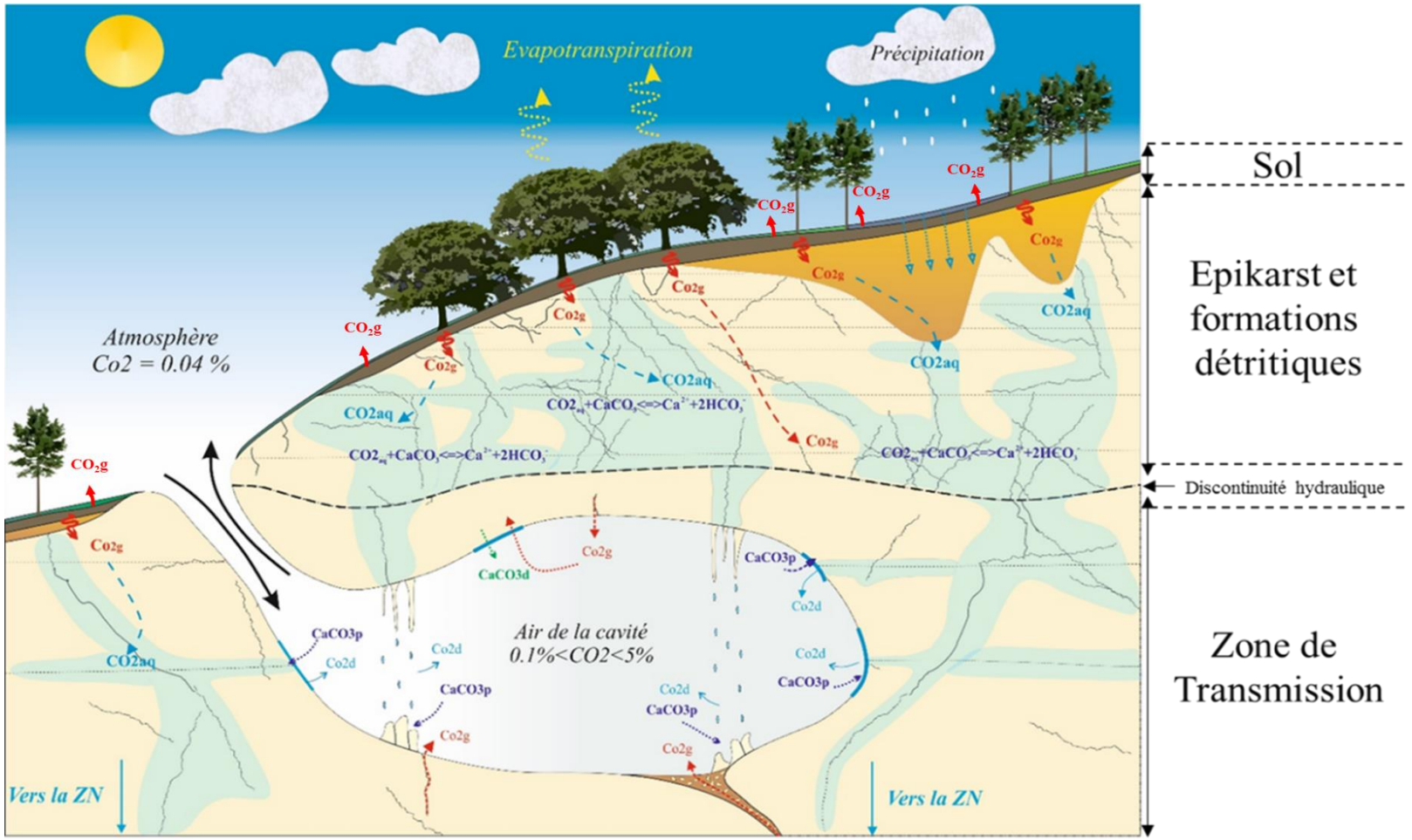


Figure I-6 : Schéma conceptuel des processus de transfert d'eau et de carbone inorganique dans les différents compartiments de la zone vadose du karst et une cavité karstique de subsurface. Les écoulements rapides (fractures) ainsi que les écoulements matriciels sont observables. La production de CO_2 est symbolisée par les flèches rouges provenant des horizons superficiels. Les flux de CO_2 gazeux (CO_2g) et dissous (CO_2aq) sont représentés sur la figure. Dans la cavité, les échanges aérologiques avec l'atmosphère sont présentés. La calcite dissoute ($CaCO_3d$) par les eaux de condensation (dont l'occurrence est contrôlée par l'humidité de l'air et la différence de température entre l'air et la paroi) ainsi que celle précipitée ($CaCO_3p$) suite au dégazage de CO_2aq contenu dans les eaux d'infiltration (CO_2d) sont symbolisées aux parois.

I.3.2.3 L'impact du pompage de l'air sur l'aérologie et les équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux :

Parallèlement et du fait de l'enjeu conservatoire de la Grotte de Lascaux, de nombreuses mesures ont été prises pour limiter la dégradation des parois ornées depuis sa découverte. Parmi celles-ci, nous pouvons citer celle qui a fait l'objet du plus de débats à savoir : la mise en place de l'extraction de l'air (2000 $m^3.j^{-1}$ soit le volume connu de la cavité de Lascaux) dans le but d'abaisser le taux de CO_2 de l'atmosphère de la cavité. Ce pompage avait été mis en place pour limiter le potentiel de dissolution de la calcite par les eaux de condensation. Cependant, l'abaissement de la teneur en CO_2 provoque une augmentation du potentiel de précipitation de calcite des eaux d'infiltration arrivant aux parois en différentes zones de la cavité. En effet, aucun indice ne démontre le caractère bénéfique ou négatif de ce dispositif sur la conservation de la cavité de Lascaux. La question posée par la DRAC Aquitaine est donc la suivante : Quel(s) est (sont) l'(les)impact(s) de l'extraction d'air sur l'aérologie et donc la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 de la cavité de Lascaux et plus particulièrement sur le comportement des eaux présentes aux parois ornées ? Les travaux pour proposer des réponses à cette question primordiale pour le conservateur représenteront une partie importante de ce manuscrit de thèse.

I.4 Stratégie mise en œuvre

Pour répondre à ces différentes problématiques, cette étude se base d'abord sur une approche naturaliste en privilégiant dans un premier temps des processus. A cette fin, l'observation et l'acquisition de nombreuses mesures dans les différents compartiments du karst ainsi que dans la cavité seront effectuées. Les informations recueillies nous permettront ensuite de proposer une méthode d'estimation des impacts potentiels des eaux aux parois de la cavité basée sur des simulations numériques prenant en compte les différentes informations recueillies dans la première phase de cette étude. Cette sous-partie présente donc la stratégie générale mise en œuvre pour étudier la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst et dans la cavité de Lascaux, les modalités d'écoulement et le marquage géochimique des eaux au sein de cette même zone vadose et enfin les impacts potentiels des eaux aux parois de la cavité de Lascaux.

I.4.1 La dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst

Dans un premier temps, pour comprendre la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la zone vadose du karst et les paramètres l'affectant, une parcelle expérimentale est mise en place et instrumentée. Elle permet de suivre en continu les PCO_2 de l'air du massif et les

différents paramètres d'intérêt (PO_2, température, pression atmosphérique, teneur en eau) directement dans des forages réalisés à différentes profondeurs dans le massif. Parallèlement, le flux de CO_2 sortant des sols de la parcelle expérimentale est aussi mesuré en continu, mais seulement durant les six derniers mois de la thèse. Des prélèvements ponctuels sont également effectués pour analyser le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C\text{-}CO_2$) pour mieux apprécier l'origine de ce CO_2 et les mécanismes l'affectant comme par exemple les échanges potentiels avec l'atmosphère extérieure.

I.4.2 La dynamique du CO_2 et l'aérologie de la cavité de Lascaux

Parallèlement, pour apprécier l'aérologie et la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux, cette étude utilise les mesures manuelles acquises depuis le commencement des suivis microclimatiques ainsi que le dispositif conséquent de mesure en continu des paramètres microclimatiques (température, PCO_2, débit, pression atmosphérique) déjà présent dans la cavité. Des capteurs de PCO_2 sont tout de même ajoutés pour accroître la résolution spatiale des données. De même, des capteurs de PO_2 sont implantés en parallèle des capteurs de PCO_2 pour suivre la corrélation supposée entre ces deux paramètres, synonyme d'une origine biogénique du CO_2 présent dans la cavité. Des prélèvements ponctuels sont aussi effectués pour analyser le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C\text{-}CO_2$) et ce dans le même objectif que pour la parcelle expérimentale. Ces différentes mesures sont réalisées en contexte d'extraction de l'air de la cavité mais aussi suite à l'arrêt de ce dispositif de pompage pour évaluer les impacts potentiels de ce dernier sur les différents paramètres suivis. Cet arrêt de l'extracteur d'air s'accompagne d'un protocole de suivi détaillé de l'état des parois et des paramètres microclimatiques de la cavité, validé au préalable par le Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux.

I.4.3 Les conditions et modalités d'écoulement dans la zone vadose du karst

Pour comprendre les modalités d'écoulement et le marquage géochimique des eaux de la zone vadose du karst, des suivis quantitatifs et qualitatifs sont effectués aux différents stades de l'infiltration de l'eau dans le massif : les précipitations, l'eau sortant du sol, l'eau sortant de l'épikarst, l'eau émergent de la zone de transmission. La pluviométrie est mesurée en continu en trois points du site, les débits de l'émergence épikarstique présente dans la cavité sont aussi mesurés toutes les minutes. Un suivi ponctuel resserré du signal hydrogéochimique (mesures *in-situ*, ions majeurs, matière organique carbonée, isotopes de l'eau et du carbone inorganique dissous) des différents types d'eau étudiés est effectué. Enfin, un suivi en continu de la géochimie (pH, Conductivité, Carbone organique Dissous, *etc.*) de l'émergence épikarstique de la cavité est mis en place. L'utilisation des traceurs naturels ainsi que des équilibres calco-

carboniques des différents écoulements doit permettre de mieux comprendre les processus affectant la géochimie des eaux ainsi que les modalités d'écoulement des eaux dans la ZNS.

I.4.4 Les simulations des impacts potentiels des eaux aux parois de la cavité de Lascaux

Enfin, les différentes informations obtenues à l'aide des suivis susmentionnés nous permettent de faire des hypothèses (chimie de l'atmosphère, géochimie initiale des eaux, volume d'eau présent à la paroi) dans le but de simuler les impacts des eaux aux parois ornées de la cavité. Ces simulations réalisées à l'aide du logiciel PHREEQC (USGS) doivent conduire à une estimation de la masse de calcite possiblement mise en jeu par les eaux de condensation et d'infiltration aux parois de la cavité avec et sans extraction de l'air de la cavité.

I.5 Organisation générale du manuscrit de thèse

Nous consacrerons donc une première partie à la description détaillée du système karstique étudié du point de vue de ses caractéristiques géomorphologiques, hydrogéologiques et climatologiques. Une seconde partie sera consacrée à l'étude de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst à travers le suivi en continu évoqué précédemment. Une troisième partie s'attachera à la compréhension de la dynamique du CO_2 et à l'aérologie de la cavité de Lascaux. Elle sera l'occasion de discuter des effets de l'extraction de l'air sur l'aérologie de la cavité. Enfin une quatrième et dernière partie sera dévolue aux modalités et conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst de Lascaux à travers l'utilisation des traceurs naturels et des équilibres calco-carboniques. Les résultats de cette étude aboutissent à la caractérisation du marquage géochimique des différents écoulements de la zone vadose et en particulier à ceux arrivant aux parois de la cavité. L'application des connaissances acquises au cours de cette thèse, y seront appliquées à la conservation des parois ornées de la cavité. Une méthode d'estimation des impacts potentiels des eaux aux parois basée sur la simulation numérique et ses perspectives dans l'optique de formaliser un outil de gestion des risques aux parois ornées de la cavité pour aider le conservateur à gérer les interventions humaines dans la cavité, seront présentées. L'influence du pompage de l'air sur l'équilibre géochimique des eaux parois sera aussi discutée au cours de cette dernière partie.

II. Présentation du contexte de l'étude : la colline de Lascaux

Le système karstique est un milieu complexe composé de différents compartiments comportant des propriétés hydrogéologiques et physiques différentes. Ce sont ces caractéristiques intrinsèques au milieu karstique qui vont conditionner en grande partie le cycle du dioxyde de carbone ainsi que le comportement hydrogéochimique des eaux de la zone vadose. Ainsi, avant de présenter les différents travaux réalisés au cours de ces trois années de thèse, il est nécessaire de décrire au préalable et de façon détaillée les contextes géologique, géomorphologique, hydrogéologique et climatique du site.

Au cours de ces trois années de thèse la zone non saturée superficielle de la colline de Lascaux a été étudiée. Cette dernière a connu une évolution géologique et géomorphologique longue et complexe. Il faut donc prendre en compte l'ensemble de l'héritage si l'on veut pouvoir appréhender correctement la grotte de Lascaux et son contexte. La grotte de Lascaux offre en effet une fenêtre d'observation tout à fait remarquable sur la dynamique du dioxyde de carbone et le signal hydrogéochimique des eaux s'infiltrant au sein de l'épikarst du fait de sa localisation à l'interface entre l'épikarst et la zone de transmission du karst. Afin de présenter les différentes informations importantes pour nos futures analyses, la description de ces différents contextes se basera sur les diverses connaissances acquises à travers les travaux réalisés sur le site d'étude depuis les années 60 mais aussi plus récemment par Lopez (2009) ainsi que le programme d'étude des contextes géologiques, géomorphologiques et pédologiques du site de la grotte de Lascaux (Bruxelles et al., 2014).

Ce chapitre sera donc divisé en trois parties avec en premier lieu la présentation des contextes géologiques et climatiques, suivie de la description de la géomorphologie et des aménagements de la cavité de Lascaux. Pour finir, le contexte hydrogéologique sera décrit dans une troisième et dernière partie.

II.1 Contextes géologique et climatologique du site de la colline de Lascaux

II.1.1 Climatologie

Bien que situé à la même latitude que Montréal ou Vladivostok, le Périgord noir jouit d'un climat éminemment tempéré de type océanique avec cependant quelques influences continentales comme en témoigne parfois les températures négatives et les chutes de neige durant les mois d'hiver. La pluviosité y est en moyenne de 900 à 1100 mm par an selon la zone géographique, répartie principalement au cours des mois d'automne et de printemps. La température moyenne de l'air atmosphérique est d'environ 12,6°C, avec des températures moyennes mensuelles comprises généralement entre 2°C et 25°C selon les années avec toutefois des records journaliers de températures négatives de -15°C et des températures positives de 32°C.

Les caractéristiques climatiques du site d'étude sont prises en compte à travers le réseau de station de mesure de Météo France, ainsi que grâce aux différentes stations de mesures implantées in-situ depuis 2011 qui viennent moderniser le dispositif de mesure présent depuis 1963 sur le site de la grotte de Lascaux.

II.1.1.1 Les dispositifs de mesure des paramètres hydroclimatiques sur le site de la grotte de Lascaux

Depuis l'invention de la cavité de Lascaux, des relevés de la température externe ont été effectués à des intervalles de temps plus ou moins importants. Les hauteurs de pluies sont quant à elles enregistrées de manière journalière à 5 kilomètres du site sur la commune de Montignac depuis 1960 par Météo France. L'évapotranspiration potentielle estimée à la station Météo France de Gourdon (150 km) sont considérées. En effet, les conditions climatiques en cette station sont similaires à celles du site de Lascaux comme en témoigne la très bonne corrélation entre les moyennes mensuelles des températures externes mesurées à ces deux points (Figure II-1).

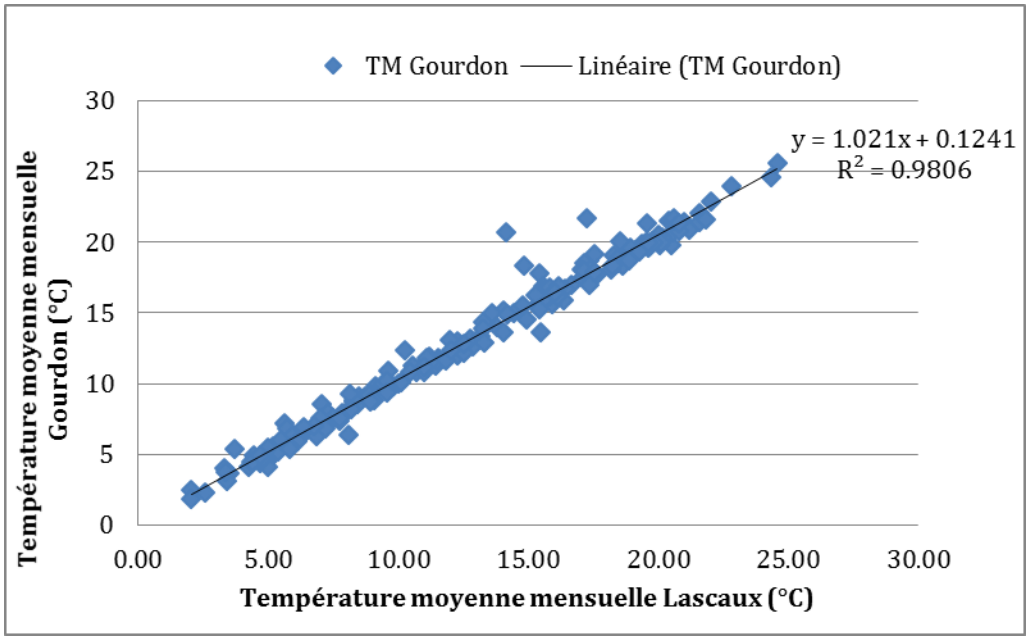


Figure II-1: Corrélation entre les températures externes moyennes mensuelles mesurées à Lascaux et à Gourdon (mesures journalières du 01/01/2013 au 01/01/2016).

Le site de la grotte de Lascaux possède quant à lui depuis 2011 son propre système de mesures météorologiques qui s'est enrichi au fil des années pour être constitué à ce jour de trois stations météorologiques complètes réparties au-dessus de la cavité de Lascaux sous les différents couverts végétaux (absence de couvert végétal, pins et chênes). Les dispositifs de mesure utilisés sont des stations météorologiques de la marque Vaisala (WXT 520) qui permettent d'enregistrer toutes les minutes, les paramètres suivants :

- La température atmosphérique extérieure (précision : ±0,3°C, sensibilité : 0,1°C),
- La pression atmosphérique extérieure (précision et sensibilité : ±0,1hPa),
- La pluviométrie par des pluviomètres à impacts (précision : 5%, sensibilité : 0,01mm)
- L'humidité relative de l'air (±5%),
- La vitesse (±0,3 $m.s^{-1}$) et la direction du vent.

A cela s'ajoutent, un pluviomètre à auget (précision et sensibilité : 0,2mm) permettant de comparer les données acquises avec les mesures effectuées par Météo France qui étaient utilisées avant la mise en service des mesures météorologiques in-situ. Des pyranomètres permettent d'enregistrer le rayonnement solaire direct et indirect (albédo) en $W.m^{-2}$.

II.1.1.2 Conditions climatiques des années 2013 à 2016

Les mesures hydroclimatiques in-situ effectuées au cours des trois années d'étude sont présentées et discutées dans cette partie. Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les

données de pluviométrie utilisées pour caractériser la période allant de 1997 à 2012, sont issues des relevés journaliers réalisés sur le site de la gendarmerie nationale de Montignac (5 km du site de Lascaux), quand ceux de nos années d'étude (2013 à 2016) proviennent directement du site d'étude. Les comparaisons restent tout de même significatives au pas annuel ou mensuel tant ces deux sites sont proches géographiquement.

Les températures extérieures sont mesurées in-situ depuis 1997, ce qui nous permet de comparer nos années études aux 15 années précédentes. Cependant, nous serons prudents dans nos interprétations du fait du changement de dispositif de mesure et de sa résolution temporelle en 2011.

Le Tableau II-1 présente donc les valeurs moyennes annuelles des températures extérieures et de pluviométrie de 1997 à 2012 et pour les quatre dernières années. La température moyenne annuelle et la hauteur de pluie tombée en 2016 considère les données du 01/01/2016 au 01/08/2016. Pour pouvoir les comparer avec les quinze années précédentes, nous présentons les valeurs moyennes de 1997 à 2012 en prenant en compte les sept premiers mois de ces années.

Tableau II-1 : Températures extérieures moyennes et hauteurs de pluie totales de 1997 à 2012 et pour les années 2013, 2014 et 2015. La température extérieure moyenne de l'année 2016 n'est pas présentée ici car cette dernière est en cours.

Paramètres	Moyenne 1997-2012	Max 1997-2012	Min 1997-2012	Moyenne au 01/08 de 1997-2012	2013	2014	2015	2016 (au 01/08)
Températures extérieures annuelles (°C)	12.61	14.06	10.59	12.48	11.51	12.84	12.75	11.96
Hauteurs de pluie annuelles (mm)	822.6	1022.6	627.6	462	1017.4	855.4	584.4	750

Pour ce qui est des températures extérieures, il s'avère que les quatre années étudiées sont particulières, avec une année 2013 froide et des années 2014 et 2015 particulièrement chaudes comme sur le reste du territoire français et même de la Terre. 2016 semble quant à elle, pour le moment, plus proche de 2013 que des deux dernières années chaudes. Il semble que les comparaisons avec les quinze années précédentes soient compliquées au vue des données de température annuelle. Du point de vue de la pluviométrie, l'année 2013 atteint le record des quinze dernières années (1997) avec plus de 1000 mm de pluie enregistrés sur le site. 2014 est

quant à elle juste supérieure à la moyenne des quinze dernières années avec 855.4 mm, alors que 2015 est l'année la plus sèche des vingt dernières années à Lascaux (584.5 mm de précipitation). 2016 avec ses 750 mm de pluie enregistrés à la fin du mois de Juillet peut être qualifiée de très pluvieuse (sept premiers mois de l'année les plus pluvieux depuis vingt ans) avec une température moyenne inférieure aux normales des quinze années précédentes.

Si l'on considère les moyennes annuelles, les quatre dernières années revêtent toutes un caractère particulier que ce soit du point de vue thermique, mais aussi de la pluviométrie. Maintenant que nous les avons replacées dans le contexte climatique local, qu'en est-il des variations intra et interannuelles si l'on s'intéresse aux moyennes mensuelles ? Ces dernières dénotent-elles d'une pluviométrie plus ou moins importante durant les périodes de recharge en eau ou alors d'orages estivaux plus importants selon les années ? Les températures (facteur contrôlant en partie l'évapotranspiration et la production de CO_2 dans les sols) évoluent-elles de la même façon durant nos années d'étude ? Pour répondre à ces interrogations, les moyennes mensuelles de la température extérieures sont présentées en Figure II-2 de 2013 à 2016, pour comparaison avec les températures mensuelles moyennes entre 1997 et 2012.

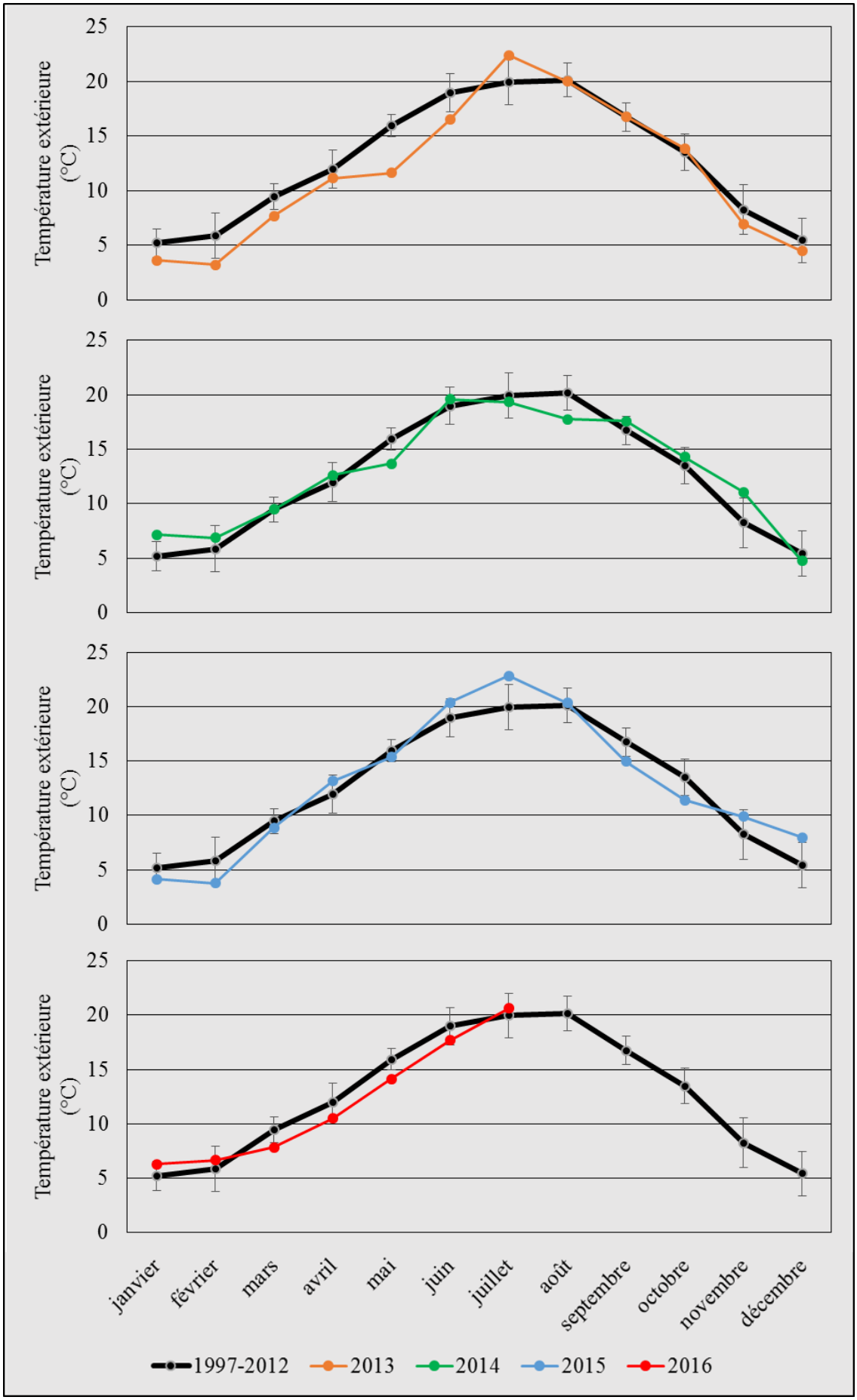


Figure II-2 : Comparaison des moyennes mensuels et écarts types des températures externes (°C) mesurées sur le site de Lascaux au cours des années 1997 à 2012 et des moyennes mensuelles de 2013, 2014, 2015 et 2016.

2013 regroupe les mois de Janvier de Juin mais aussi de Novembre à Décembre les plus froids de notre période d'étude avec des valeurs inférieures aux normales de la période allant de 1997 à 2012, venant ainsi appuyer les observations faites grâce aux moyennes annuelles. Les autres mois de l'année sont quant à eux proches des températures moyennes mensuelles enregistrées sur les quinze dernières années. 2014 est particulièrement chaude toute au long de l'année avec les températures mensuelles supérieures aux normales enregistrées sur notre site d'étude pour les mois de Janvier à Mars, mais aussi de Septembre à Novembre. A contrario, les mois de Mai, Juillet et Août sont quant à eux les plus froids de ces quatre dernières années avec des températures deux à trois degrés en-dessous des normales de saison. 2015 est caractérisée par un début d'année plutôt froid, puis par les mois d'Avril à Août les plus chauds de notre période d'étude. L'automne 2015 est plus froid qu'en 2013 bien que le mois de Décembre marque un record de chaleur sur le site. 2016 est pour l'instant semblable aux normales saisonnières avec malgré tout, des mois de Mars à Juin bien plus froid qu'à l'accoutumée.

Pour analyser les variations intra et interannuelles de la pluviométrie à l'échelle mensuelle, la Figure II-3 présente les quantités mensuelles de cette dernière de 2013 à 2016 pour comparaison avec les moyennes des quinze dernières années.

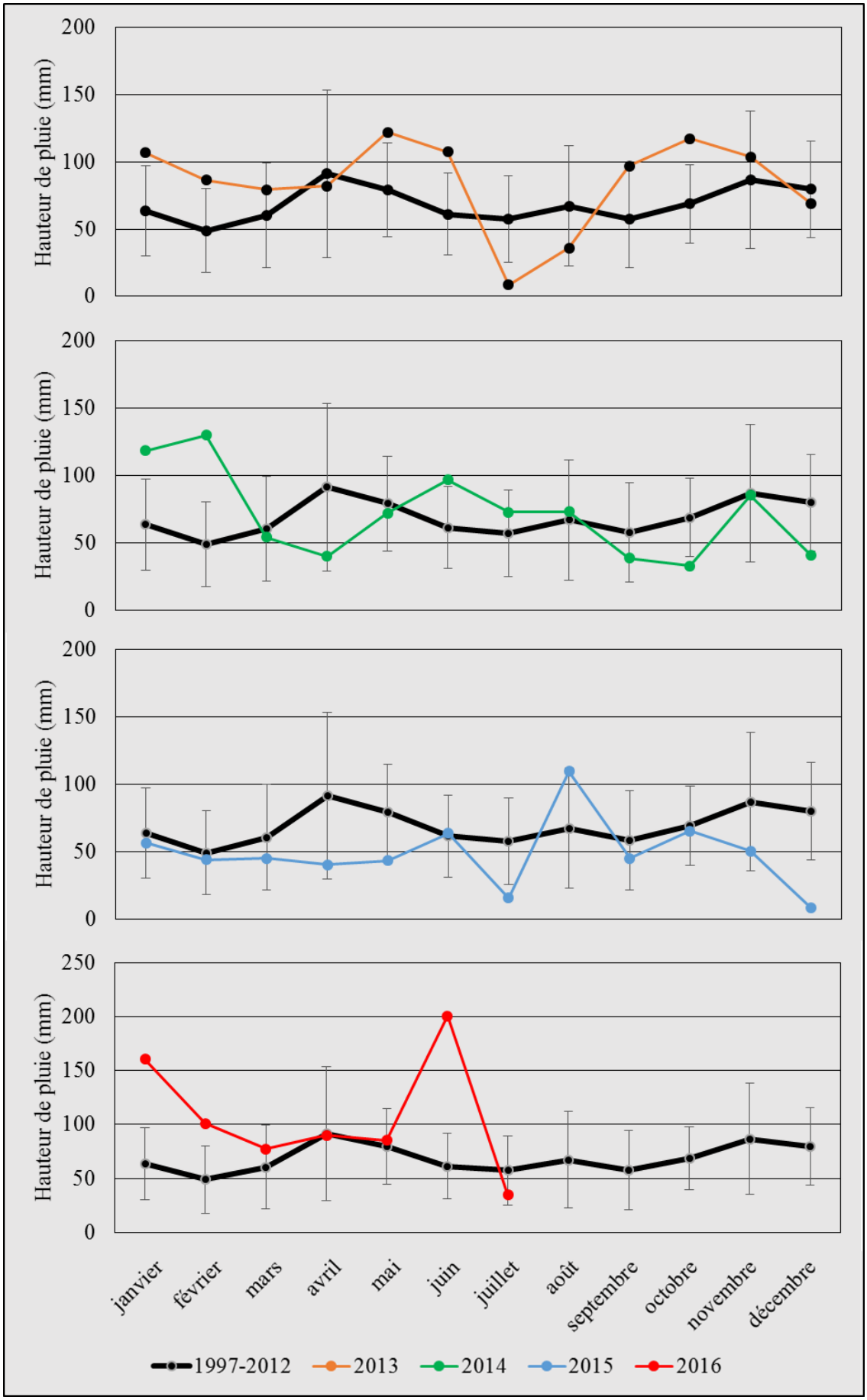


Figure II-3 : Comparaison des moyennes et écarts types mensuels des hauteurs de pluies (mm) mesurées sur le site de Lascaux de 1997 à 2012 et des hauteurs de pluie mensuelles de 2013, 2014, 2015 et 2016.

L’année 2013, la plus pluvieuse depuis 20 ans, est marquée par des cumuls mensuels supérieurs à la normale des quinze années précédentes pour tous les mois de l’année à l’exception des mois d’Avril et Décembre qui lui sont similaires et des mois de Juillet et Août qui sont quant à eux bien plus déficitaires. 2014 est une année dans la normale avec, malgré tout, des mois de Janvier, Février et Juin excédentaires et des mois d’Avril et d’automne plutôt déficitaires. L’année 2015 voit des cumuls mensuels systématiquement inférieurs aux normales mis à part pour le mois d’Août au cours duquel de violents orages estivaux se sont abattus sur le site de la Grotte de Lascaux. Enfin, l’année 2016 en cours peut être déjà considérée comme historique avec des précipitations record aux mois de Janvier et surtout de Juin avec 200 mm précipités et notamment une journée orageuse ayant produit plus de 90 mm de pluie.

En résumé, les années 2013 à 2016 peuvent se caractériser d’un point de vue climatique de la façon suivante :

- 2013 : froide et très excédentaire,
- 2014 : chaude et excédentaire,
- 2015 : chaude et très déficitaire,
- Janvier à Août 2016 : froide et très excédentaire.

II.1.2 Géologie de la colline et du site de Lascaux

II.1.2.1 Contexte géologique régional

Le site de Lascaux s’intègre dans une série de formations géologiques du Crétacé supérieur sous recouvrements détritiques, qui affleure abondamment au nord du Bassin Aquitain et en Périgord noir en particulier (Figure II-4).

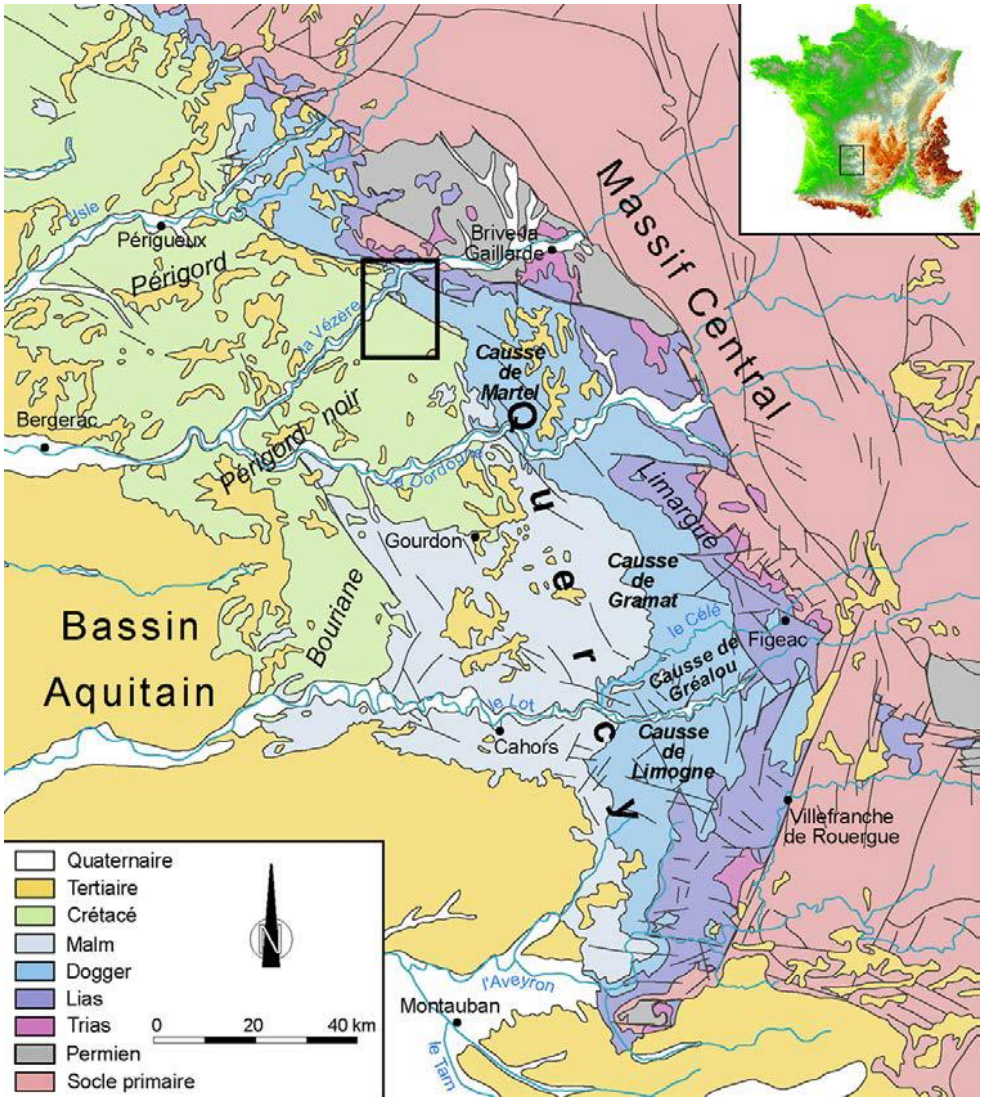


Figure II-4 : Situation de Lascaux sur la carte géologique synthétique de la bordure Nord-Est du Bassin Aquitain (Infoterre, BRGM).

Cette région située en bordure nord-est, à prédominance agricole, peut se diviser en deux grandes catégories :

- Les cultures dans les grandes vallées, arboriculture, maïs et les polycultures de plateaux et vallées sèches constituées par les céréales, le tabac et les noyers.
- La forêt, qui couvre environ 80 % du territoire, est essentiellement constituée de taillis et de petites futaies difficilement exploitables.

La Vézère et la Dordogne sont les deux rivières principales qui traversent le périmètre ainsi défini. Le réseau hydrographique est dichotomisé et très hiérarchisé en sous-bassins de faibles dimensions.

Le paysage typique du Périgord noir est constitué de plateaux culminant fréquemment entre 300 et 350 m NGF et de vallées situées à des altitudes voisines de 100 m NGF.

L’histoire géomorphologique du Périgord noir est longue et complexe comme l’illustre la Figure II-5.

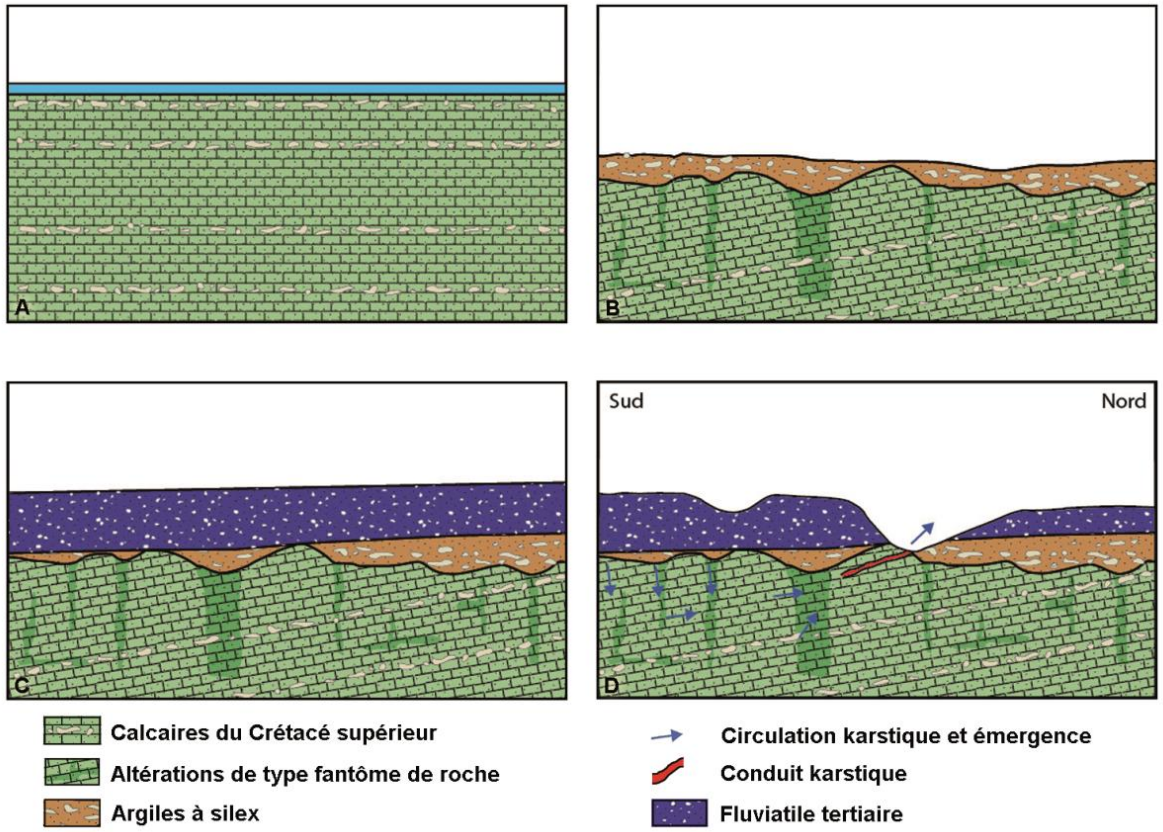


Figure II-5 : Synoptique des principales étapes de l'évolution continentale de la surface des plateaux karstiques du Périgord (Bruxelles et Camus, 2014).

Après le retrait définitif de la mer au Crétacée, les calcaires ont été soumis à une longue phase d’altération continentale importante du Crétacé Supérieur à l’Eocène (B). Dans la partie supérieure, cette altération s’est traduite par une décarbonatation et par la formation d’argiles (Trauth, 1985). Les résidus non solubles des calcaires formés d’argiles à silex et de sables ont alors formé une couverture de matériaux meubles contribuant à la poursuite de ce phénomène d’altération à leur interface avec les calcaires sous-jacents (cryptokarstification). Ce sont ces résidus remaniés qui sont à l’origine des formations latéritiques attribuées « par erreur » au Sidérolithique par Vouvé (1968) sur le site de la Grotte de Lascaux. Dans la région, ces altérites sont constituées d’argiles sableuses brun rouge à orangé et de silex et ne sont que très peu présentes sur le site de la Grotte de Lascaux. En profondeur, cette altération se poursuit par une altération dite isovolumique *in-situ* dans les calcaires. Le long des discontinuités (failles, fissures, diaclases, contact lithologiques, *etc.*), les calcaires ont subi une dissolution avec préservation des structures lithologiques (Quinif, 1999). Différemment des processus de karstification classiques, la roche n’est pas altérée totalement. En effet, les circulations d’eau sont trop peu importantes (gradient faible) pour entrainer les particules non dissoutes. Cette

altération est à l'origine des formations de sables jaunes à roux présents sur le site d'étude. Cette phase d'altération est suivie par une phase de dépôt de formations sédimentaires d'origine fluviatile au Tertiaire (C). Enfin, l'abaissement du niveau marin qui s'en suit conduit à l'abaissement du niveau de base régional et donc au creusement des vallées par les cours d'eau laissant apparaitre des conduits karstiques (D). Les différents versants ont ensuite étaient affectés par des processus de colluvionnement et d'érosion mécanique liée au climat de la zone d'étude.

Ces différents processus successifs de sédimentation et d'érosion ont conduit à une organisation géologique et géomorphologique représentée en Figure II-6. Cette carte géologique montre que l'ensemble des reliefs calcaires qui surplombent la Vézère sont fossilisés par des épandages détritiques de plusieurs origines.

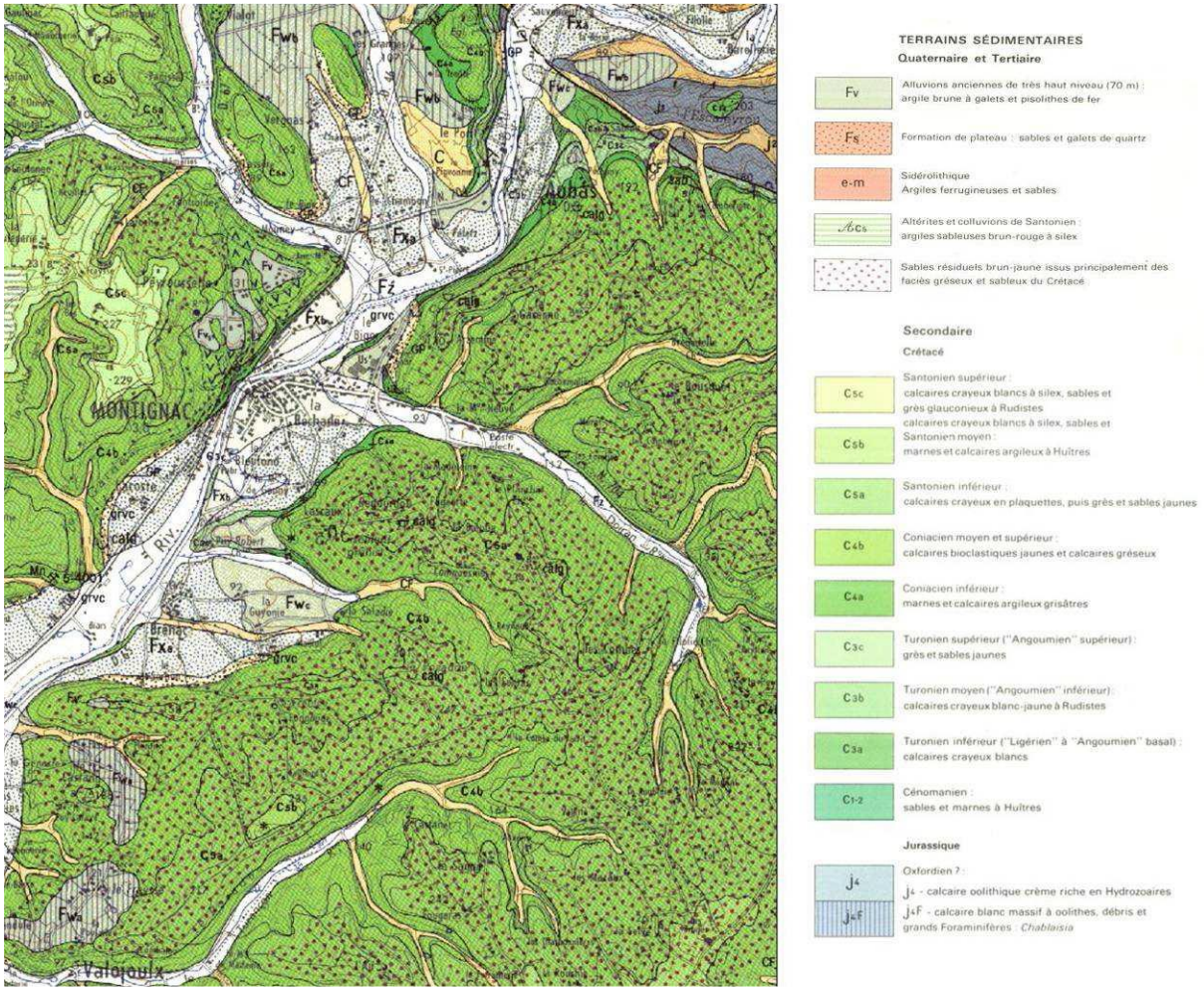


Figure II-6 : Extrait de la carte géologique de Terrasson au 1/50 000 (Infoterre BRGM).

C'est dans ce contexte que la cavité de Lascaux s'est développée. Sa formation correspond selon Bruxelles et Camus (2014) à « *une phase de transition entre les circulations dans un aquifère captif au sein de la structure de drainage fantômisée et une phase associée à*

des mises en charge probablement contemporaine du fonctionnement du système cryptokarstique ».

II.1.2.2 Géologie et géomorphologie de la colline de Lascaux

Du point de vue géomorphologique, la colline de Lascaux forme un promontoire isolé des reliefs de plateau de la rive gauche de la Vézère par les vallées du Doiron au Nord et de la Saladie au Sud. Entre 210 et 200 m d'altitude, ce promontoire présente une topographie plane. En périphérie de cette surface sommitale, des vallons entaillent faiblement le haut de versants. A l'Est du site de Lascaux et à l'Est du site du Regourdou, ces vallons se rejoignent pour former des cols . La partie Ouest de la colline, est couverte d'une forêt de chênes, de pins et de châtaigniers sur le secteur du site de Lascaux proprement dit.

Les calcaires y affleurent pour former deux niveaux de corniches sur le versant Sud de la colline. Ces escarpements accueillent plusieurs cavités sur le site des abris sous roche de la Balutie. Au pied de ces corniches des talus d'éboulis recouvrent de façon discontinue les pentes, mais aussi le versant occidental dominant le fond de la vallée de la Vézère. En pied de versant, ces tabliers d'éboulis se raccordent aux paliers des terrasses de la Vézère ou aux formations alluviales qui comblent les vallées du Doiron et de la Saladie.

Du point de vue du contexte géologique, la colline de Lascaux peut donc être assimilée à un promontoire du plateau calcaire régional du Crétacé supérieur. Cette colline est principalement constituée par une assise de calcaires gréseux jaunâtres coquilliers (calcarénites) du Coniacien moyen et supérieur, dans laquelle s'est développé le réseau karstique comprenant la grotte de Lascaux. En continuité, on observe des dépôts du Santonien inférieur au sommet de la colline, de même nature (calcarénites) et donc difficilement dissociables. La base de la colline est quant à elle constituée d'une formation à dominante marneuse du Coniacien inférieur. Le log stratigraphique s'établit de la manière suivante d'après Bruxelles & Camus (2014) :

- C3c, Turonien supérieur. Niveaux de grès et de sables jaunes de 10 à 20 m d'épaisseur. Ce niveau est riche en grains de quartz, de plus en plus grossiers vers le haut.
- C4a, Coniacien inférieur. Marnes grises à vertes bleues, riches en glauconie et en pyrite (3-4 m). Elles passent progressivement à des calcaires noduleux gris-jaune. Cette couche affleure à la base de la colline et notamment dans le talus de la route de Lascaux.
- C4b, Coniacien moyen et supérieur (C4b). Calcaires microcristallins bioclastiques jaunes à rosâtres à la base (une trentaine de mètres) puis calcaires jaunes bioclastiques

et gréseux plus massifs (4- 7 m). Au-dessus, 15 à 20 m de calcaires durs bioclastiques jaunes et rosâtres, organisés en grandes dalles.

- C5a, Santonien inférieur. Ce niveau s'étend jusqu'au plateau du Regourdou. Calcaires crayeux blancs en plaquettes (une quinzaine de mètres) et puis calcaires gréseux roux en petits bancs et à stratifications obliques (50-60 m).

Parallèlement, des altérites autochtones sont observées dans les couloirs de fantômisation mais aussi en position de tête de vallon ou encore dans des poches au sein de crypto-lapiaz (à l'Est et à l'Ouest de la cavité). Les sables roux correspondent à la partie superficielle remaniée des altérites (front d'oxydation). Lorsque l'épaisseur de ces sables est plus importante, ils prennent progressivement une teinte jaunâtre comme c'est le cas dans les couloirs de fantômisation. Une carte géologique de la colline de Lascaux est présentée en annexe (**Annexe 1**).

II.1.2.3 Géologie du site de la grotte de Lascaux

Le site de la grotte de Lascaux qui correspond à l'environnement géologique direct de la cavité de Lascaux est caractérisé par une géomorphologie remarquable constituée par des affleurements de calcaire entaillés par des dépressions profondes comblées de formations détritiques sablo-argileuses autochtones (altérites) et allochtones (recouvrement quaternaire) que nous dénommerons altérites est et ouest au cours de ce manuscrit. La dalle de calcaire du Coniacien supérieur est constituée de couches de calcaire délité formant un épikarst sur les 5 à 8 premiers mètres de profondeur et de calcaires plus massifs en profondeur. La Figure II-7 présente un écorché géologique produit par Bruxelles et Camus (2014) en tenant compte des anciens travaux de Vouvé (1968) mais aussi des travaux plus récents de Lopez (2009).

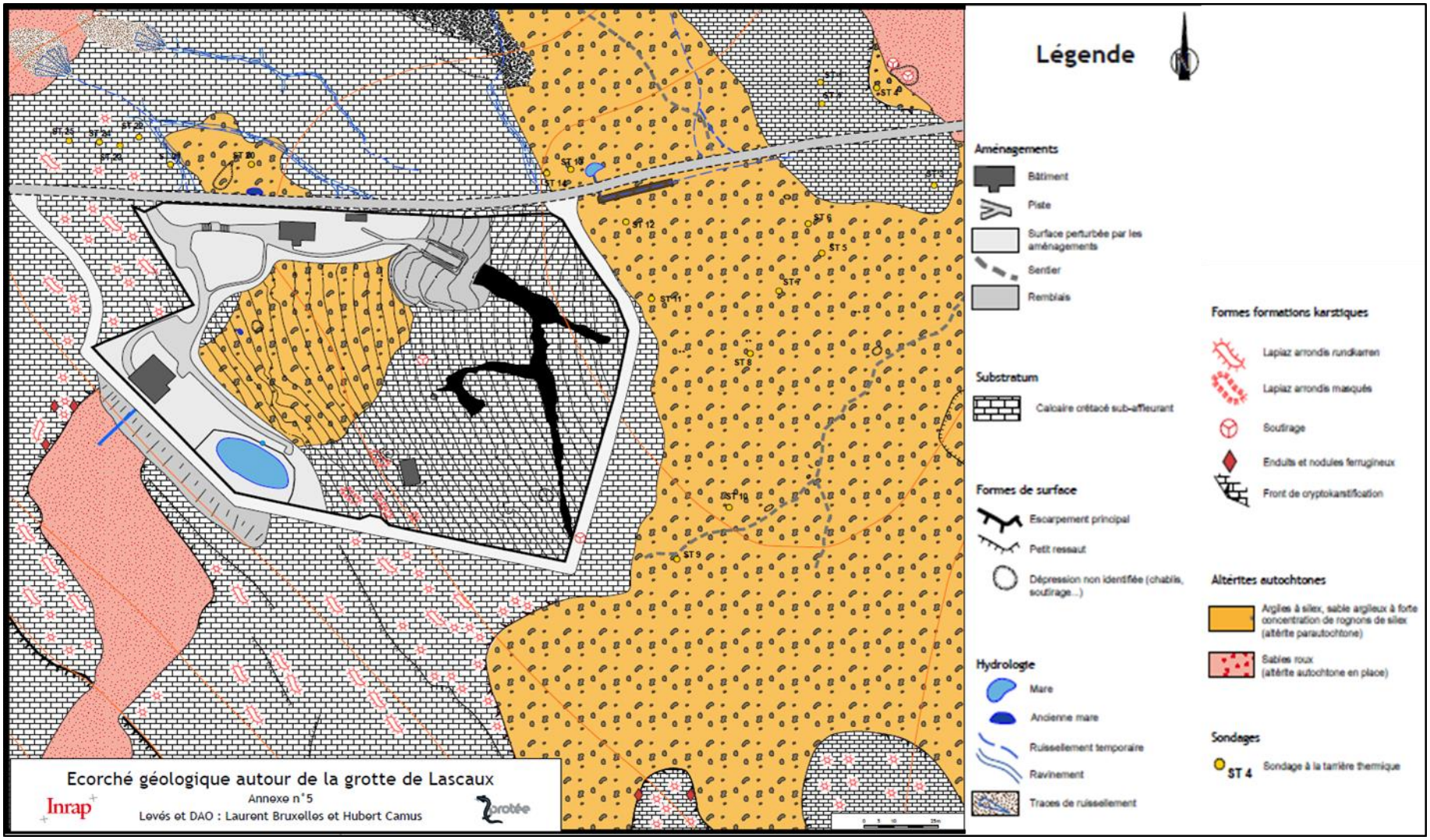


Figure II-7 : Ecorché géologique du site de la grotte de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014).

À l'échelle du site, l'alternance d'affleurements calcaires et sablo-argileux interprétés comme des formations détritiques de remplissage par Vouvé (1968) et H. Schoeller (1965) est présente. D'après Bruxelles et Camus (2014), la dénomination « remplissage » est impropre et correspond plutôt à des altérites autochtones. Trois zones (Figure II-7) peuvent être distinguées sur le secteur de Lascaux :

• Les altérites Est : grand couloir d'altération orienté NW-SE, avec des argiles à silex, et des sables gris à rognons et sables roux,

• La dalle calcaire : secteur central appelé aussi « promontoire calcaire », recouverte localement de colluvions et de sables gris,

• Les altérites Ouest : sable roux remanié à l'extérieur de l'enceinte et présence d'argile à silex et sable argileux dans l'enceinte du site.

Les formations superficielles de recouvrement présentes sur le site de la grotte de Lascaux ont été mis en place par cinq systèmes de colluvionnement différents. De la nature de ces accumulations de matériaux superficiels, de leur positionnement ainsi que de leur modalité de drainage, vont découler différents types de pédogénèse à l'origine de différents types de sols sur lesquels se sont implantés différentes espèces végétales. Leur répartition spatiale revêt donc un intérêt particulier pour l'étude de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du site de Lascaux. La répartition ainsi que la nature des accumulations de matériaux de recouvrement suite au colluvionnement sont présentées en **Annexe 2**.

II.1.2.4 Couvertures végétale et pédologique du site de la grotte de Lascaux

Cinq entités pédologiques différentes sont recensées par Poulenard (2014) sur le site de la grotte de Lascaux (Figure II-8). Les principales caractéristiques intéressantes pour l'analyse de la dynamique du CO_2 de chaque sol rencontré sont les suivantes :

- Les rendosols ou rendzines sont localisés sur la plus grande partie de la dalle de calcaire Coniacien. Ces sols de faible profondeur (de 30 à 40 cm) sont sombres et riches en carbonate de calcium ce qui procure à l'eau présente dans ces derniers un pH neutre à alcalin (7,5 à 8 ,5). Leur horizon profond est une source de carbone organique.
- Sur les altérites à l'est de la cavité se sont développés des brunisols pseudoluviques sableux acides (pH compris entre 4 et 5) comportant des niveaux argileux à sablo-argileux à 50 cm de profondeur. Ces sols sont des puits de carbone organique mais sont aussi une source d'azote organique.

- Des calcisols leptiques peu épais bruns calciques (pH neutre) sont observés entre les deux premières unités. Ils se sont formés à partir de sables exogènes apportés par le colluvionnement et non à partir de l'altération de la dalle calcaire comme c'est le cas des rendosols. Les limites de cette unité pédologique correspondent aux bordures d'une zone anciennement exploitée pour la culture viticole,
- La partie nord-ouest de la parcelle protégée a été fortement perturbée par les aménagements réalisés sur le site depuis l'invention de la cavité de Lascaux. Ces anthroposols-lithosols sont quasiment inexistants (inférieurs à 5 cm d'épaisseur) et formés de fragments de calcaire remaniés et de remblais.
- Sur les altérites ouest se sont développés trois types de sols différents avec de l'est à l'ouest des calcisols dupliqués correspondant à une unité de transition entre les rendosols de la dalle calcaire et les calcisols pelosoliques rubéfiés (sols bruns calciques argileux rubéfiés). Enfin, à l'aval sont répertoriés des sols sableux de surface correspondant à des brunisols pseudoluviques.

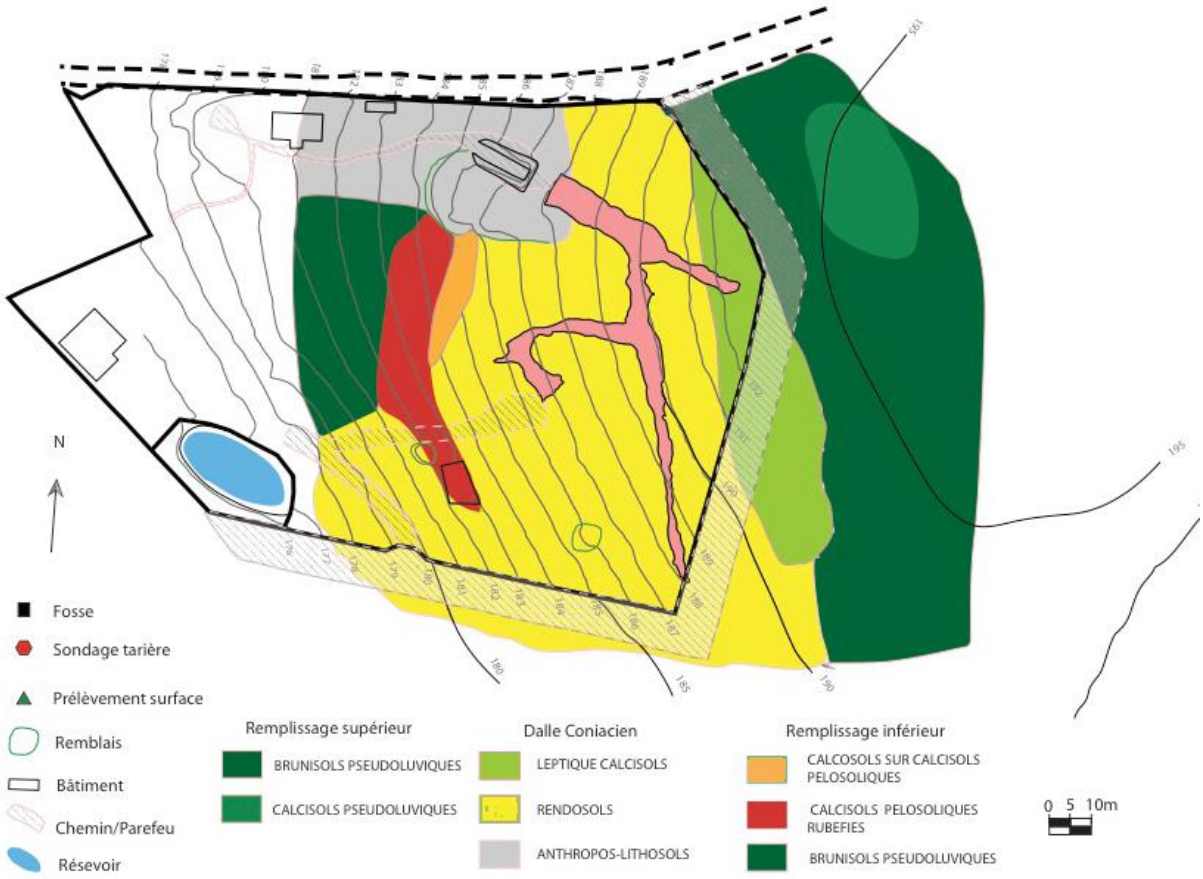


Figure II-8 : Carte de répartition des unités pédologiques du site de la grotte de Lascaux (Poulenard, 2014).

Les différents faciès pédologiques ont été comparés à la répartition spatiale des essences végétales se développant sur le site d'étude. Trois essences d'arbres principales sont présentes

dans l'environnement direct de la cavité (Figure II-9) ou l'on retrouve des futaies de pins sur les brunisols des altérites ouest, des taillis de chênes sur les rendosols de la dalle calcaire dans laquelle la cavité se développe ainsi que des taillis de châtaigniers sur les brunisols des altérites à l'ouest de la grotte. Les limites de ces différents couverts végétaux correspondent aux limites des divers types de sols rencontrés. En effet, les conditions hydriques, nutritives et de pH des sols ne sont pas favorables à l'implantation de toutes les essences végétales. Ces variations de couverts végétaux pourraient influer sur la production de CO_2 dans les sols ainsi que sur les volumes de précipitations qui s'infiltrent vers la profondeur.

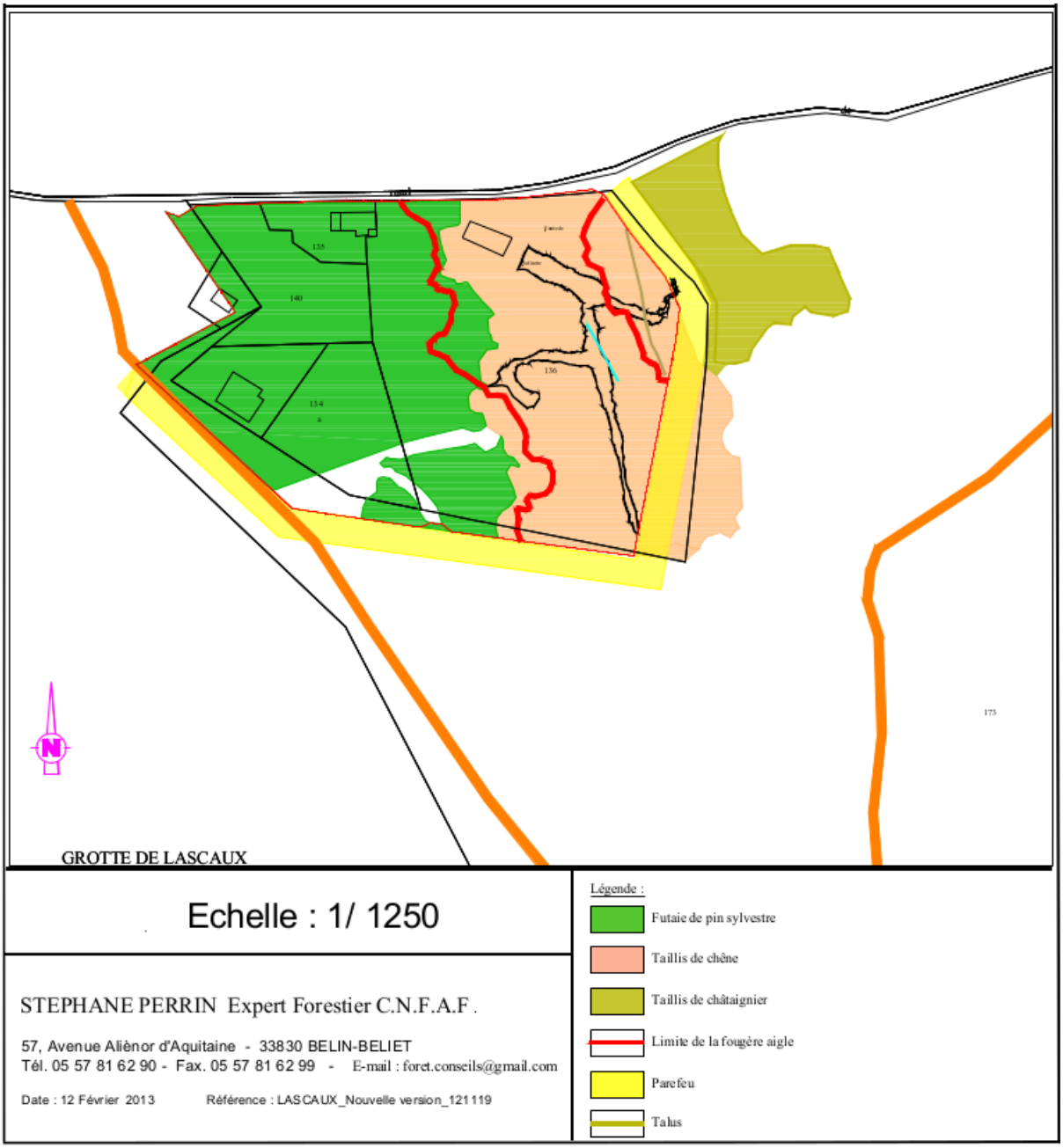


Figure II-9 : Cartographie GPS de la végétation et des sols à proximité de la cavité (Perrin, 2014).

II.2 Géomorphologie et aménagements de la cavité de Lascaux

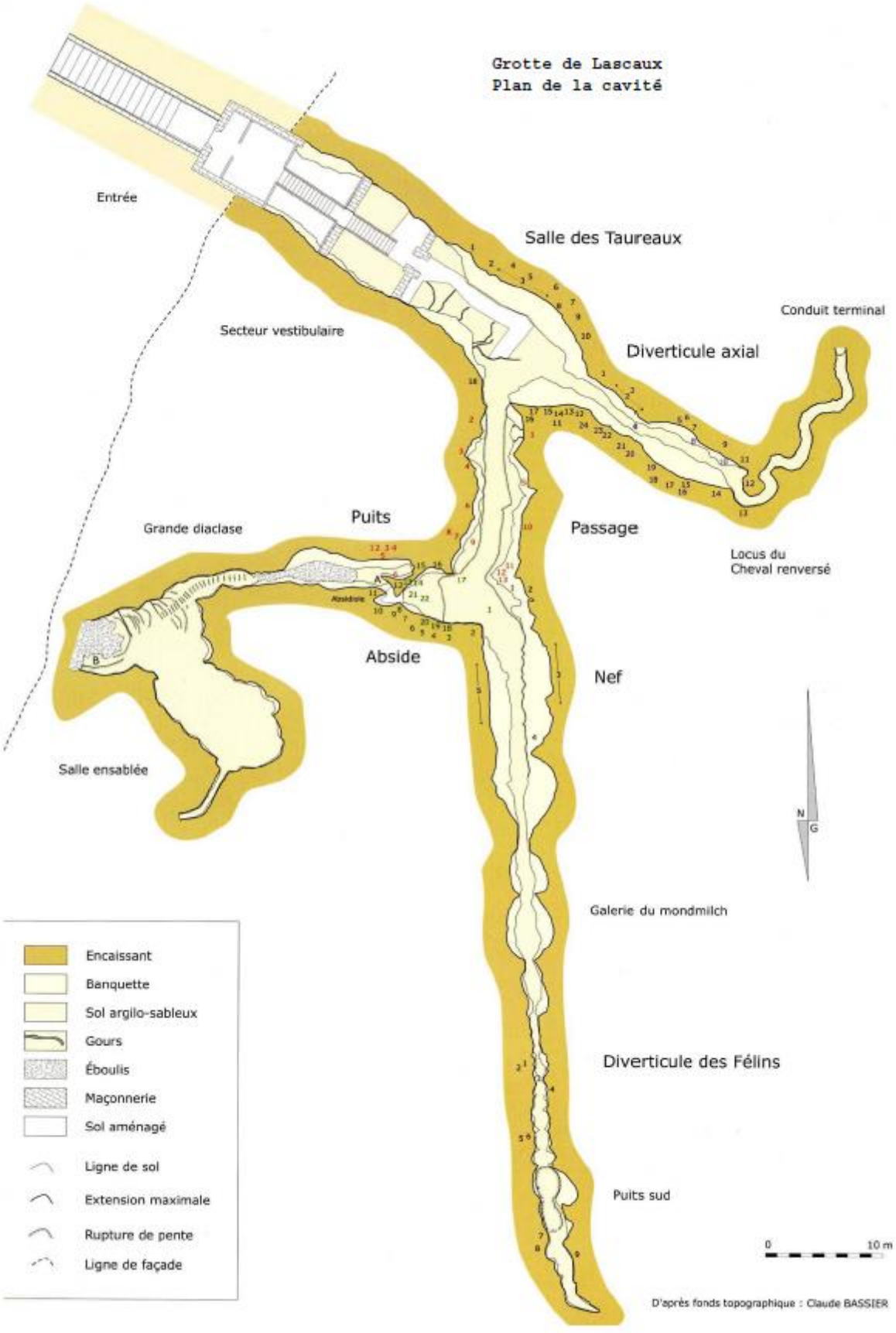
L'étude de la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux nécessite de définir convenablement les principaux traits géomorphologiques de la grotte de Lascaux. Cette dernière ayant été fortement remaniée depuis sa découverte, il est aussi important de présenter les principaux aménagements réalisés et notamment les gaines permettant l'extraction de l'air.

II.2.1 Géomorphologie de la cavité de Lascaux

La grotte de Lascaux est développée dans la zone non saturée d'un système karstique à faible profondeur (entre 3 et 25 m selon les zones). Sa seule entrée est isolée de l'atmosphère extérieure par une porte en acier et deux sas (SAS1 et SAS2). La grotte se développe sur une longueur de 250 mètres et présente un dénivelé d'une vingtaine mètres. Elle est généralement divisée en trois parties:

- La zone axiale qui regroupe la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial,
- La zone de droite qui comprend le Passage, l'Abside, la nef, la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins,
- La Grande Diaclase qui se compose de la zone du Puits du Sorcier et de l'éboulis en sa partie basse ainsi que des Salles Ensablées et du Haut de la Diaclase dans sa partie sommitale.

La Figure II-10 présente un plan comportant la localisation des différentes salles composant la cavité de Lascaux.



Norbert Aujoulat. Lascaux : le geste, l'espace et le temps, Paris, Seuil (Arts rupestres), 2004, p. 31.

Figure II-10 : Plan de la grotte de Lascaux présentant la division de cette dernière en différentes salles (Aujoulat, 2004).

Remarque : pour une lecture plus aisée et faciliter le cheminement du lecteur dans la cavité, les terminologies suivantes seront utilisées tout au long de ce manuscrit : Sas1 (SAS1), Sas2 (SAS2), Salle des Taureaux (ST), Diverticule Axial (DA), Passage (PAS), Abside (ABS), Nef (NEF), Galerie Mondmilch (GM), Cabinet des Félins ou Diverticule des Félins (CF), Eboulis du bas de la Grande Diaclase (BD), Puits du Sorcier (PS), Haut de la Diaclase (HD) et Salles Ensablées (SE). Les différents capteurs permettant l'enregistrement des données en continu dans ces zones de la cavité reprendront cette terminologie.

La Figure II-11 montre une représentation en trois dimensions de la grotte de Lascaux extraite du relevé 3D réalisé par Perrazio Ingénierie ©.

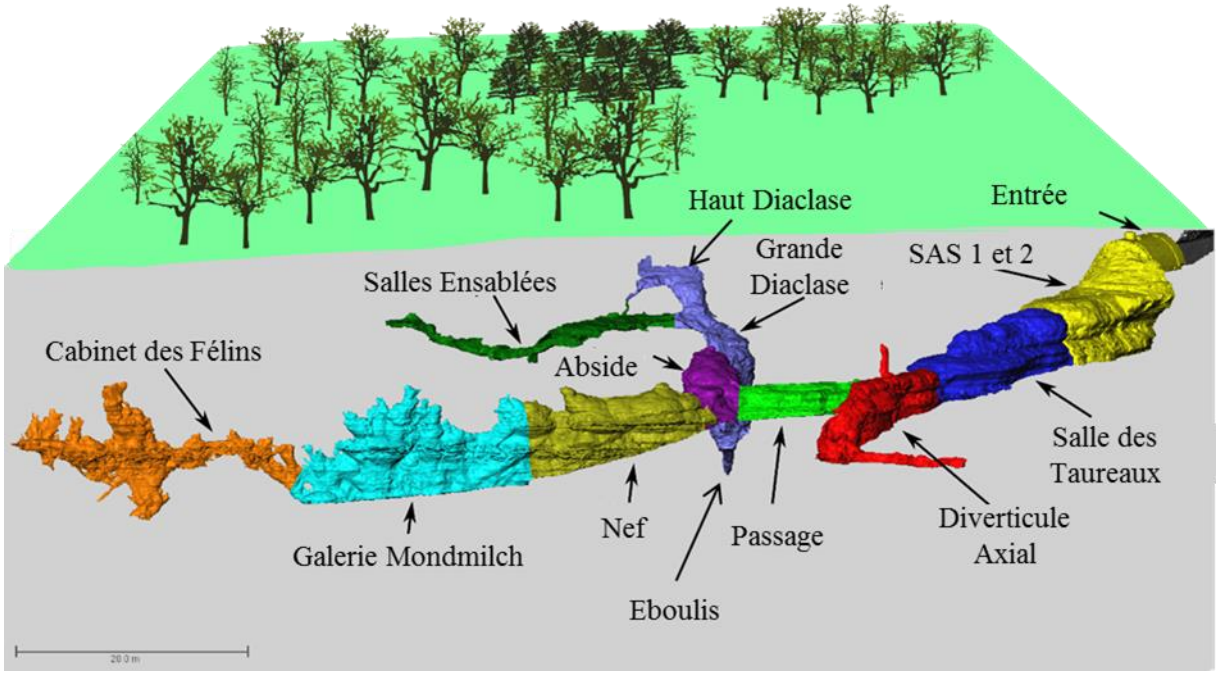
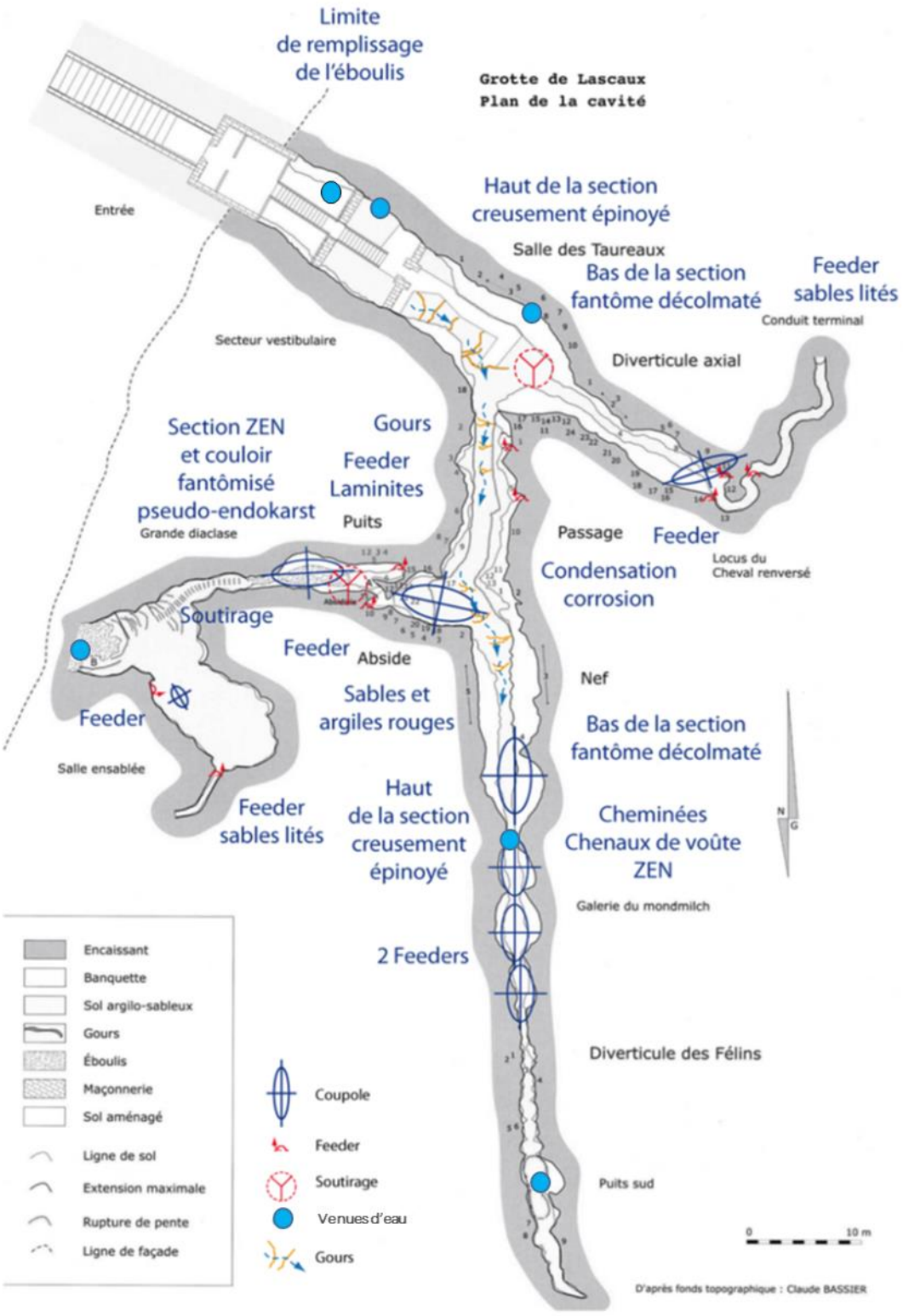


Figure II-11 : Représentation en 3D présentant la localisation des différentes salles de la Grotte de Lascaux. Les différentes couleurs permettent de distinguer les limites des différentes zones de la cavité. Le sol et la végétation sont représentés de façons schématiques et n'autorisent donc pas une interprétation précise du point de vue des profondeurs.

Il est maintenant important de décrire en détails la morphologie de la cavité. Cette description est produite à partir des observations des différents plans et relevés 3D à notre disposition et notamment de la carte des principales formes morphologiques (Figure II-12) relevées par Camus et Bruxelles (2014).



Norbert Aujoulat. Lascaux : le geste, l'espace et le temps, Paris, Seuil (Arts rupestres), 2004, p. 31.

Figure II-12 : Plan de la grotte de Lascaux comprenant la localisation des différentes salles ainsi que des figures géomorphologiques permettant d'expliquer sa formation par les processus de fantômisation et de creusement en zone épinoyée. La principale arrivée d'eau ainsi que le cheminement passé de ces écoulements à travers les gours dans la cavité sont aussi localisés (modifiée d'après Bruxelles et Camus, 2014).

La partie vestibulaire est considérablement remaniée par les aménagements, cependant, il est important de noter qu'une émergence épikarstique est présente dans cette zone. Cet

écoulement est en effet à l'origine des différents gours retrouvés dans les différentes salles plus en profondeur.

La zone axiale correspond à la Salle des Taureaux et au Diverticule Axial. Elle est formée par un conduit de 35 mètres de longueur sur 6 mètres de large dans la Salle des Taureaux et 2 mètres de large dans le Diverticule axial avec un rétrécissement important à l'entrée de cette salle. Un ombilic de 15 mètres de long prolonge le Diverticule Axial. Dans cette zone, le haut de la section du conduit est caractérisé par une morphologie arrondie qui témoigne d'un creusement en zone épinoyée comme en atteste la coupole du Diverticule Axial, quand la partie basse correspond à un fantôme décolmaté (section moins large). Il est important de noter que des suintements non pérennes sont observés sur les parois de la Salle des Taureaux.

La partie droite de la grotte se compose d'un long boyau de 80 mètres de longueur se développant à partir du côté droit de la Salle des Taureaux au niveau de la zone de soutirage. Ce conduit est presque plat dans sa première partie, le Passage, qui représente une zone d'échange entre la zone axial et la partie inférieure de la cavité comme en témoignent les figures d'altération présentes aux parois de cette salle. Il s'ouvre sur l'Abside, une zone circulaire haute de 4 mètres qui peut être assimilée à une coupole de dissolution. Au sud de cette zone partiellement artificialisée, démarre l'extrémité du conduit avec la Nef, la Galerie mondmilch et le Cabinet des Félins. La Nef correspond à un long boyau de 20 m de long pour 5 m de large et une hauteur sous voûte de 4 à 5 m. Cette partie de la grotte présente un dénivelé de 6 m. Ce segment est prolongé par la Galerie mondmilch et le Cabinet des Félins. Cette dernière salle plus restreinte représente la partie terminale de ce conduit. Elle semble être isolée des autres parties de la grotte par un étroit boyau qui rend son accès difficile. Comme le Diverticule Axial, la section de cette zone laisse apparaitre une zone basse peu large correspondant à un fantôme de roche décolmaté quand la partie haute dénote à travers ses chenaux de voûte ainsi que ses cheminées et coupoles, d'un creusement en contexte épinoyé. Deux zones d'infiltration ponctuelles sont connues à la voûte de la Galerie Mondmilch ainsi qu'au plafond du Cabinet des Félins.

La Grande Diaclase commence à partir de l'ouest de l'Abside dont elle est isolée par une trappe et un opercule. Le Puits du Sorcier, accessible par une échelle, est situé 5 m en dessous de l'Abside et représente la partie basse de la Grande Diaclase. L'éboulis présent dans cette zone constitue la zone la plus basse de la Grande Diaclase. De là, la Grande Diaclase se développe sur 30 mètres à l'ouest et remonte à moins de 5 mètres sous la surface au niveau du Haut de la Diaclase. Plusieurs racines ainsi que des infiltrations intermittentes sont observées

dans cette zone soulignant la proximité de la surface. Les Salles Ensablées sont reliées à cette diaclase par un couloir de 3 mètres de long et 1 mètre de large. Cette zone de la grotte est en grande partie rempli par des sédiments sablo-argileux lités et prolongés par un ombilic. La formation de cette Grande Diaclase est la résultante de processus de fantômisation et de creusement en contexte épinoyé.

II.2.2 Aménagements réalisés par l'Homme

De nombreux aménagements ont été effectués dans la cavité depuis son invention en Septembre 1940. Ces derniers peuvent impacter de manière directe (le cas du pompage ou de la machinerie de conditionnement) ou indirectement l'aérologie de la cavité de Lascaux. C'est pourquoi, il paraît nécessaire de décrire les plus importants d'entre eux.

II.2.2.1 Les Sas de sécurité

A sa découverte, la cavité est isolée vis-à-vis de l'atmosphère extérieure. Seul un trou provoqué par la chute d'un arbre a permis son invention. Pour permettre l'accès aux visiteurs, l'entrée de la cavité, comblée par des éboulis, est aménagée laissant alors l'air extérieur s'infiltrer dans la cavité et perturber l'équilibre microclimatique du milieu souterrain ayant permis la conservation des parois. Pour contrer ce processus, deux Sas de sécurité sont rapidement mis en place. Actuellement, le premier Sas (SAS1) est composé des trois compartiments (C1, C2 et C3) indépendants et isolé par des cloisons, le deuxième Sas (SAS2) étant ouvert sur la partie ornée de la cavité (Figure II-13).

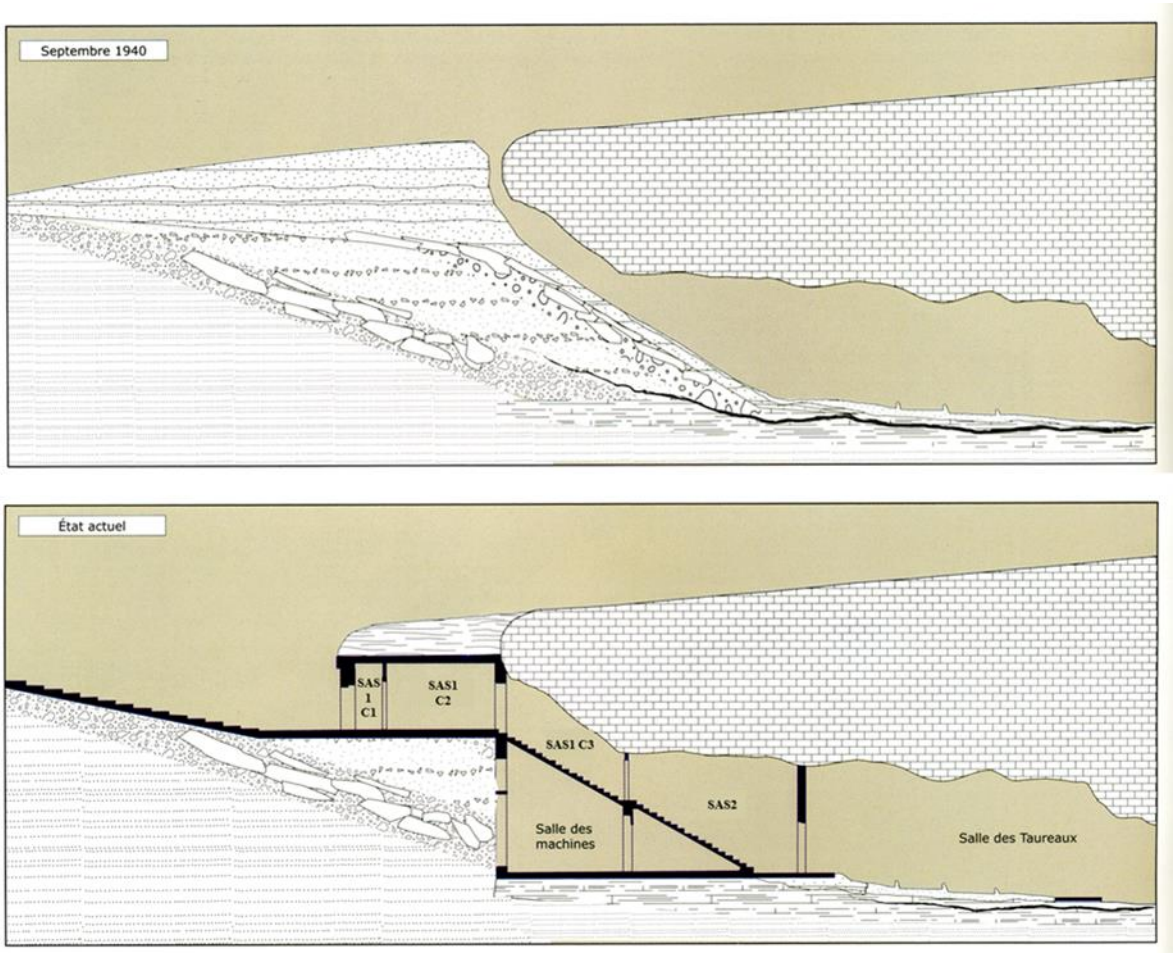


Figure II-13 : Coupes schématiques de la zone d'entrée de la cavité à sa découverte en 1940 (en haut) et actuellement suite à l'implantation des deux SAS de sécurité et de la Salle des Machines (au milieu) (Aujoulat, 2004).

Ces deux Sas permettent de maintenir la stabilité des conditions microclimatologiques de l'atmosphère souterrain avant l'évidement de l'éboulis situé à l'entrée de la cavité. Leur présence permet en effet de limiter fortement les échanges directs avec l'atmosphère extérieure.

De plus, comme la Figure II-13 le montre, une partie importante de l'éboulis originel a été excavée pour permettre la mise en place de la machinerie de conditionnement de l'air ainsi que le dispositif d'extraction de l'air dans la Salle des Machines.

II.2.2.2 La machinerie de conditionnement de l'air

Depuis 1965 et les travaux de la première Commission Scientifique, plusieurs systèmes d'assistance climatique ont été implantés, nécessitant une profonde modification de la cavité avec notamment la réalisation de la Salle des Machines à l'entrée de la partie ornée. Ces dispositifs avaient pour fonction d'entretenir les mouvements d'air naturels de la cavité tout en limitant l'assèchement des parois et la formation de plages de condensation sur celles-ci. En effet, à l'arrivée de la période printanière, la température de la roche dans la Salle des Taureaux diminue créant un gradient thermique avec la roche. C'est ce déséquilibre qui est

potentiellement à l'origine de la condensation sur les parois de la cavité. C'est pourquoi, la machinerie est mise en marche pour refroidir l'air et limiter les écarts de température avec la paroi. La mise en route de l'assistance climatique permet de stabiliser la température de l'air et de la roche dans la Salle des Taureaux, et par extension dans la cavité. Elle permet en outre le maintien d'un écart positif entre la température de l'air et la température de la roche à la paroi gauche. En d'autres termes, une légère tendance à la condensation à la paroi gauche est maintenue après la mise en route de l'assistance climatique. Une baisse trop forte de la température de l'air qui entraînerait le desséchement du support des œuvres pariétales est alors évitée.

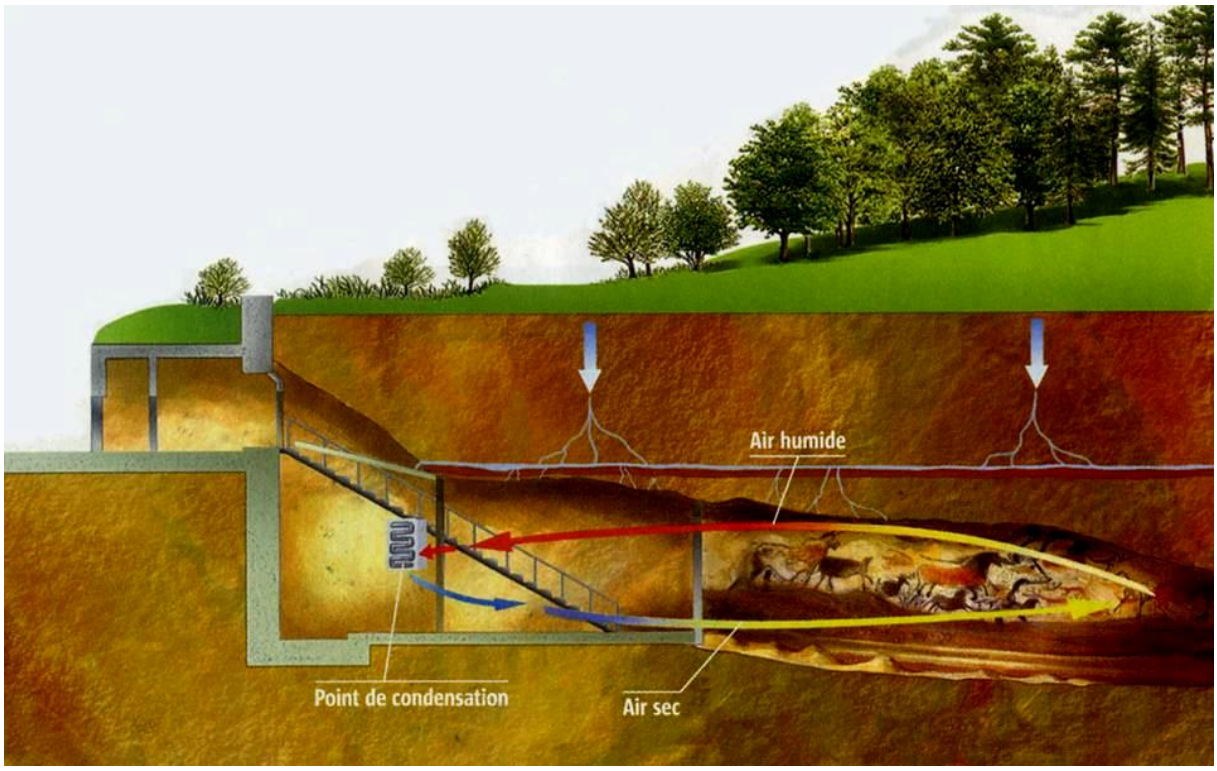


Figure II-14 : Représentation schématique du principe d'action de la machinerie sur l'aérologie de la Salle des Taureaux. La représentation des écoulements d'eau dans le massif sus-jacent n'est pas correcte, elle ne doit donc pas être considérée comme telle (Le Monde, 2000).

Pour cela, le nouveau système installé dans les années 2000 et modifié au cours du temps, fait appel comme le précédent a des échangeurs de chaleur (eau air) placés derrière les ouvertures hautes du mur de la salle des machines (Figure II-14).

La mise en route de la machinerie influe donc sur l'évolution des paramètres microclimatiques de la cavité. Il conviendra donc de prendre en compte le fonctionnement de la machinerie au cours de nos futures interprétations.

II.2.2.3 L'extracteur d'air

L'extraction de l'air à l'éboulis du Puits du Sorcier a été mise en place le 18 Octobre 1966. La décision a été prise par la commission scientifique après la première crise à la fin des années 50. La question posée à l'époque aux différents scientifiques était de déterminer s'il était important de maitriser les taux de dioxyde de carbone et d'humidité dans la cavité et si oui, quel protocole mettre en place. Malgré les recommandations d'Henri Schoeller (1965) évoquées au paragraphe I.2.2.2, ce dispositif est installé dans la cavité. L'extraction fut d'abord effective dans différentes parties de la cavité (Salle des Taureaux, Galerie Mondmilch, etc.) avant d'être cantonnée à l'éboulis du Puits du Sorcier (Figure II-15).

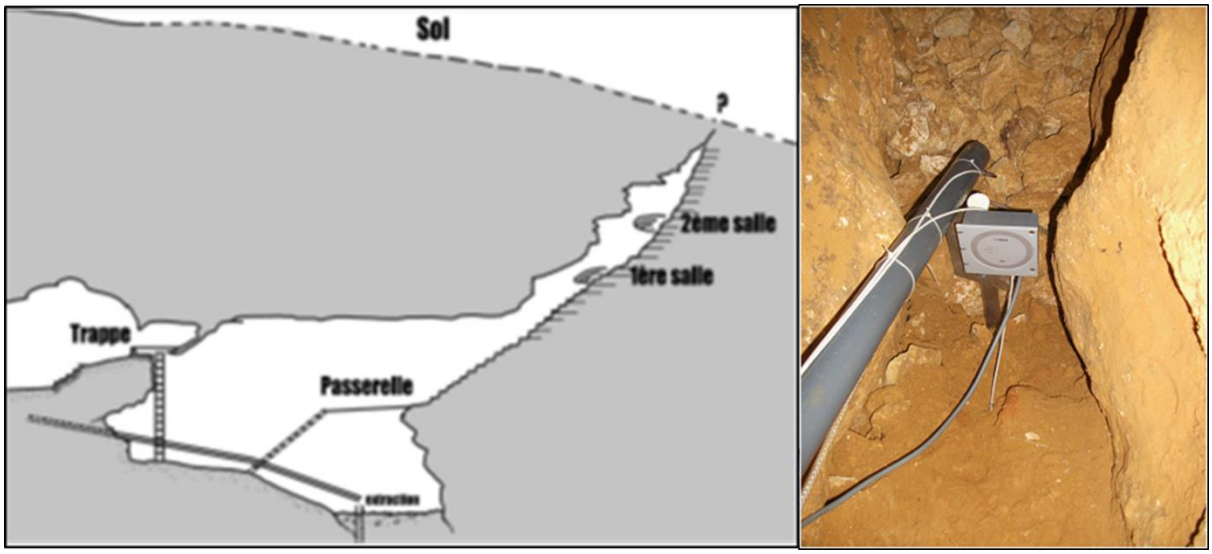


Figure II-15 : Représentation schématique (à gauche) du pompage au niveau de l'éboulis de la Grande Diaclase, photographie du tube d'extraction positionné au niveau de l'éboulis (notons la proximité avec le capteur de CO_2).

L'air est donc extrait du Bas de la Diaclase par une pompe située dans la Salle des Machines qui refoule ensuite l'air en dehors de la cavité. La conduite traverse donc du point de pompage vers la Salle des Machines, l'Abside, le Passage, la Salle des Taureaux et le SAS2. Le débit de pompage mesuré en entrée du tube d'extraction dans l'éboulis à plusieurs reprises, a montré des valeurs deux fois inférieures à celles enregistrées en sortie du dispositif d'extraction (40 à 50 $m^3.h^{-1}$ contre 80 $m^3.h^{-1}$). Cette différence suggère qu'une partie de l'air extrait ne provient pas de l'éboulis mais des autres salles de la cavité traversées par la conduite dont l'étanchéité s'est sans doute détériorée au cours du temps.

On comprend alors l'importance de ce dispositif sur l'aérologie de la cavité et notamment sur les paramètres microclimatiques et les PCO_2 de la cavité. En effet, cette extraction permet de renouveler le volume d'air de la cavité (environ 2100 m^3) approximativement une fois par jour.

II.3 Contexte hydrogéologique local

Une des problématiques de ces travaux de thèse étant de comprendre les conditions d'écoulement sur le comportement hydrodynamique et hydrogéochimique des eaux s'infiltrant dans la zone vadose, il est nécessaire de décrire le contexte hydrogéologique du système karstique de la colline de Lascaux. Cette partie a donc pour but de présenter de façon détaillée l'hydrogéologie générale de la colline de Lascaux mais aussi les principales émergences étudiées au cours des trois années de recherche.

II.3.1 Hydrogéologie de la colline de Lascaux

Les différentes émergences appartenant au système karstique de la colline de Lascaux ainsi que les émergences annexes sont présentées en Figure II-16.

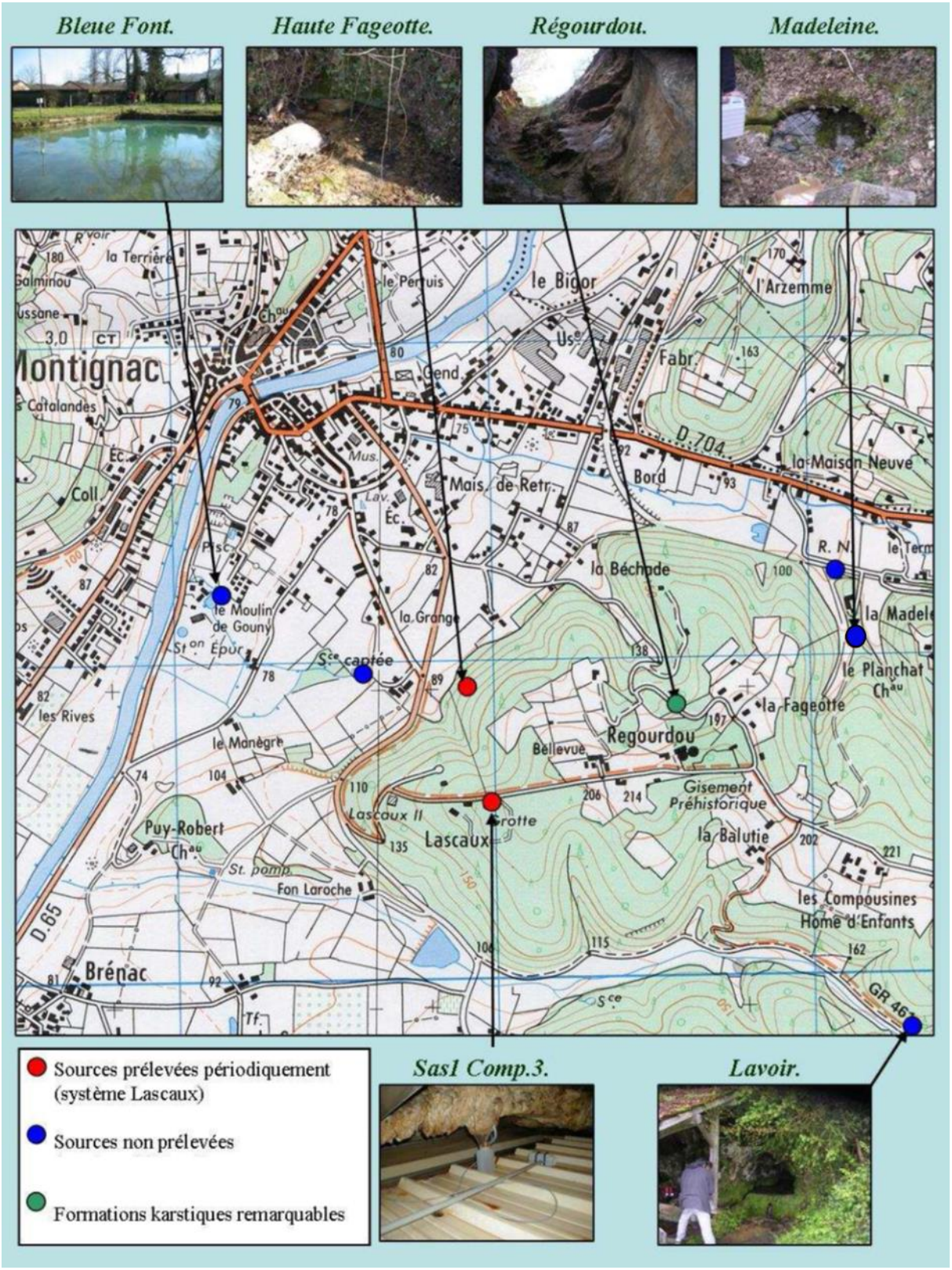


Figure II-16 : Localisation des différentes émergences du système karstique de la colline de Lascaux et des émergences des autres systèmes locaux (d'après Lopez, 2009).

La colline de Lascaux est donc une butte témoin formée de calcaires et de calcaire gréseux du Coniacien au Santonien inférieur dans lesquels circulent les eaux que nous nous proposons d'étudier. Globalement, les calcaires marneux du Coniacien inférieur constituent à la fois la base de la colline et le mur de cet aquifère. Même si leur qualité d'imperméable semble

médiocre (présence de nombreuses fractures et fissures dans la formation), le contraste de perméabilité avec les terrains supérieurs est suffisant pour permettre la création de réserves pérennes dont nous suivons un des exutoires principaux : la source de la Haute Fageotte d'altitude 120 m NGF. D'après le rapport du bureau d'étude SHE, cette émergence pérenne présente des débits compris entre 3 $m^3.h^{-1}$ (Juin 2014) en période d'étiage et 10 $m^3.h^{-1}$ en période de crue (Février 2014). Les écoulements sont drainés jusqu'à cette source par des failles approximativement parallèle aux plus grandes pentes.

D'autres exutoires plus diffus soulignent cette discontinuité hydraulique notamment au lieu-dit La Madeleine ou encore en aval de la Haute Fageotte ou des écoulements diffus ont été recoupés par les travaux du facsimilé Lascaux IV. Toutes ces sources pérennes présentent des débits faibles et ne seront pas étudiées au cours de ces travaux.

Des phénomènes de drainance descendante doivent vraisemblablement s'établir au niveau des formations calcareo-marneuses semi-perméables, la colline de Lascaux constituant ainsi une zone d'alimentation de l'aquifère régional du Turonien supérieur. Les sources observées plus en aval dans la vallée (La Fageotte et Bleue Font) proposent des débits nettement plus importants et surtout une température plus élevée de 2 °C témoignant d'un stockage d'importantes réserves d'origine sub-profonde, turonienne et peut être jurassique, dont les aires d'alimentation s'étendent probablement au niveau des plateaux calcaires du crétacé supérieur à l'est et au nord. La coupe schématique de la colline de Lascaux construite à partir des observations de Schoeller (1965) et de Bruxelles et Camus (2014) permet de synthétiser ces informations (Figure II-17).

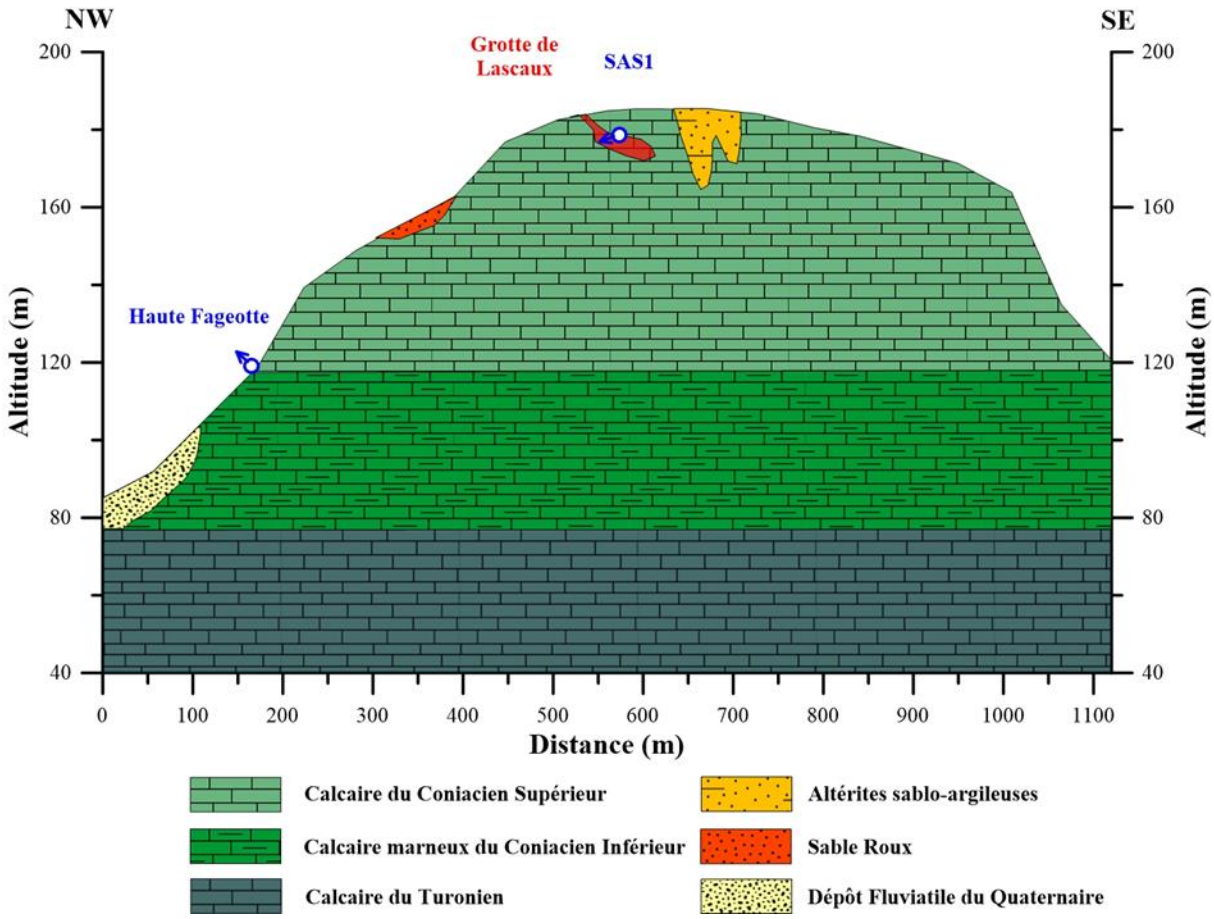


Figure II-17 : Coupe schématique de la colline de Lascaux montrant la localisation des deux émergences étudiées au cours de la thèse ainsi que la position de la cavité de Lascaux.

II.3.2 Les écoulements dans la cavité de Lascaux

Plusieurs manifestations d'écoulement sont reconnues dans la cavité de Lascaux. On retrouve en effet des infiltrations importantes dans le SAS 1 de la cavité à faible profondeur. S'ajoutent à cela des exfiltrations aux parois du SAS 2 et de la Salle des Taureaux mais aussi des arrivées d'eau brusques et ponctuelles sous l'influence de fortes sollicitations pluvieuses dans la partie basse de la cavité. La Figure II-18 montre la localisation de ces différents écoulements dans la cavité de Lascaux.

Figure II-18 : Les différents écoulements connus dans la cavité de Lascaux.

Au cours de cette étude, seule l'émergence épikarstique du SAS 1 a été suivie régulièrement (prélèvement hebdomadaire, mesures en continu du débit, des paramètres physico-chimiques intrinsèques tels que le pH ou la conductivité électrique mais aussi la fluorescence de l'eau). Les autres points sont présents dans la partie ornée de la cavité, il n'était pas envisageable d'effectuer un suivi assidu de ces écoulements.

L'émergence épikarstique du SAS 1 :

L'émergence suivie au toit du SAS 1 de la grotte de Lascaux (alt. : 186 m NGF) constitue l'exutoire d'un système épikarstique. Cette venue d'eau non pérenne se situe à l'interface entre l'épikarst et la zone de transmission (Figure II-19). La différence de perméabilité entre les calcaires gréseux et altérés constitutifs de l'épikarst et les calcaires massifs sous-jacents semble suffisante pour la création d'une nappe épikarstique à écoulement temporaire.

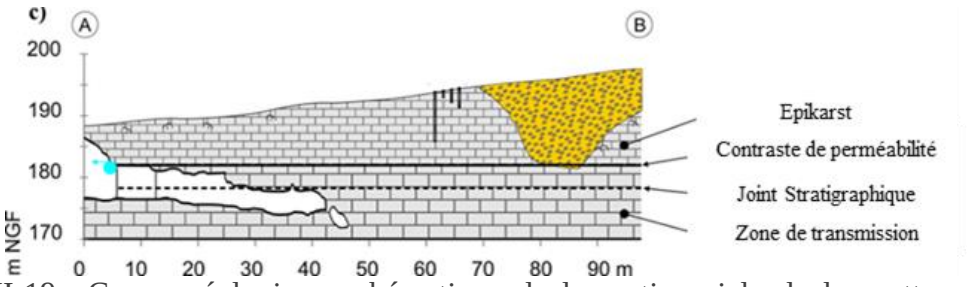


Figure II-19 : Coupe géologique schématique de la partie axiale de la grotte montrant le positionnement de l'émergence épikarstique et le joint stratigraphique principal, responsable des exfiltrations aux parois de la Salle des Taureaux (D'après Lopez, 2009 et Bruxelles et Camus, 2014).

Le recoupement de cette interface par la cavité explique alors des écoulements à la voûte du SAS 1 (Figure II-20).

Figure II-20 : Photographie montrant l'émergence épikarstique étudié au plafond du SAS 1. Les glissières en inox permettent de récupérer les eaux d'égouttement et de les conduire dans la citerne de relevage à l'intérieur de laquelle l'évolution du niveau d'eau est enregistrée en continu.

La puissance des terrains carbonatés présents au-dessus de cette discontinuité hydraulique évolue entre 7 et 8 m (relevé 3D de la grotte de Lascaux et de ses environs). Ces calcaires sont fissurés, mais les fractures semblent peu nombreuses et majoritairement comblées

par les formations de recouvrement. Au moment de la découverte, les eaux d'infiltration tombaient de la voûte sur l'éboulis d'accès, puis alimentaient les gours au sol du Sas II et de la Salle des Taureaux avant de disparaître pour partie à l'entrée du Diverticule Axial et pour le reste dans la Galerie à Mondmilch. Depuis 1958 et probablement jusqu'à 1964, ces eaux sont recueillies et drainées par un caniveau vers le suçoir de la Salle des Taureaux (emplacement actuel des transformateurs d'éclairage). Depuis 1964 ces eaux tombent sur un collecteur incliné et sont guidées vers une citerne (sous l'escalier du SAS II, devant la porte de la salle des machines); de là elles sont reprises et conduites à l'extérieur et à l'aval du réseau à l'aide d'une pompe immergée. Le schéma explicatif de ce dispositif de relèvement est présenté en Figure II-21.

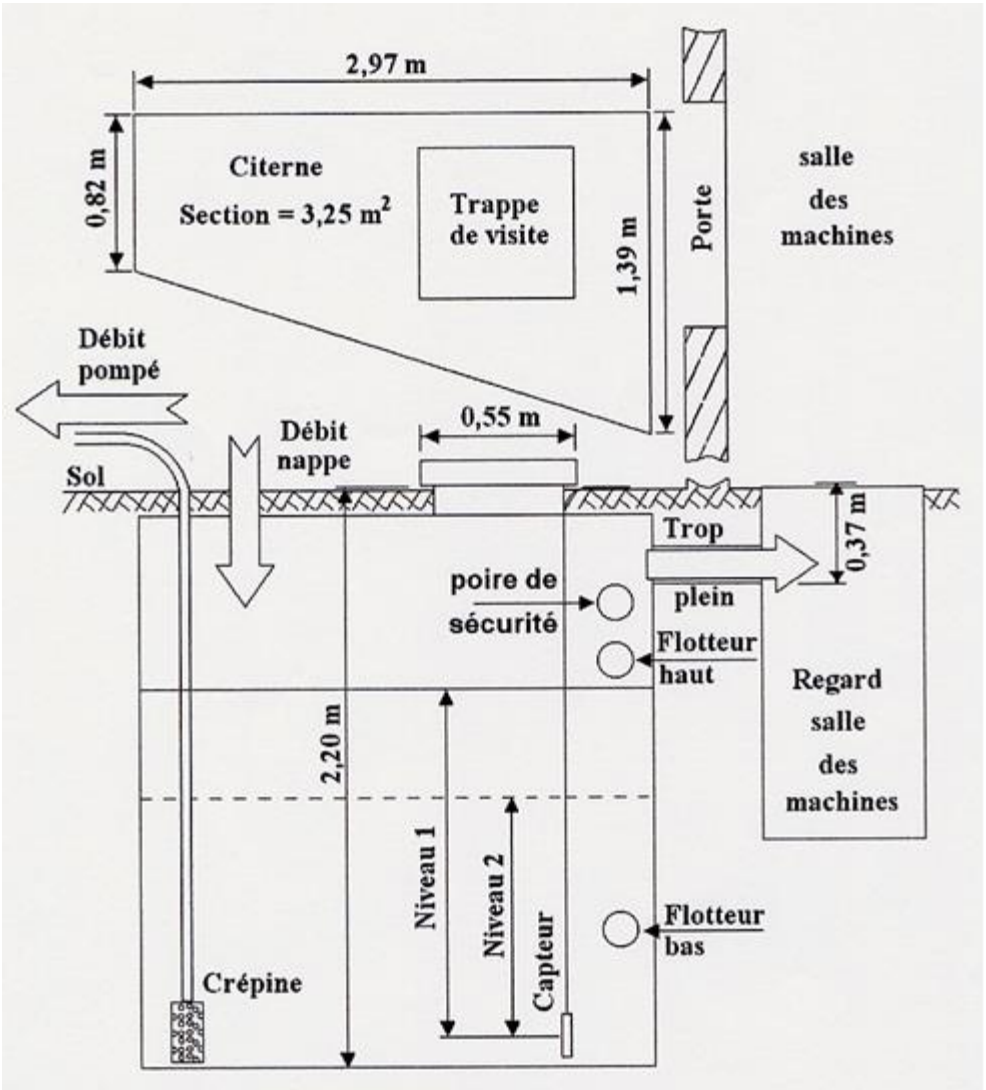


Figure II-21 : Vues de dessus et en coupe de la citerne de relevage des eaux d'infiltration située dans le SAS 2.

Le régime hydrogéologique de cette nappe est calqué sur le régime pluviométrique saisonnier ; les écoulements sont les plus intenses entre janvier et février et la vidange complète se fait progressivement de mai à juillet. Le tarissement est complet entre les mois d'août et

octobre et quelquefois plus tard encore. Les débits, variables au rythme des séquences pluviométriques, évoluent entre plus de 20 m^3 par jour et 0 m^3 par jour. Le déphasage par rapport à la pluie est en moyenne de 24 heures en période d'écoulement mais peut être seulement de quelques heures. Lopez (2009) montre par des analyses corrélatoires que le temps de réponse à un évènement pluvieux est compris entre 22 heures et 88 heures selon l'état de saturation en eau de l'épikarst.

Il apparaît complexe de déterminer, par la simple étude géologique du site, l'origine exacte des écoulements que draine l'émergence du Sas1 et donc de définir son impluvium. Il semblerait en effet peu judicieux de limiter le système épikarstique à la seule dalle calcaire du Coniacien moyen dans laquelle est développé le « paléoconduit karstique » de Lascaux. Schoëller (1963) avait estimé la surface du bassin d'alimentation entre 1262 m² (méthode des chlorures) et 1590 m² (rapport pluie – débit) ce qui correspond approximativement à la surface des affleurements localisés entre la source du Sas1 et les altérites situés en amont. Lopez (2009) prend en compte une surface d'alimentation similaire pour simuler les débits de l'émergence épikarstique à l'aide de modèles réservoirs. Minvielle (2015) utilise quant à lui une aire d'alimentation plus restreinte comprise entre 500 et 1000 m² selon les années simulées en raison d'une prise en compte d'une ETP (Evapotranspiration Potentielle) différente.

Cependant, ce calcul ne renseigne en rien sur la distribution spatiale de l'alimentation de cette réserve épikarstique non pérenne. Or, dans l'épikarst, l'alimentation peut être très localisée, se limitant à des discontinuités structurales qui constituent des zones d'infiltration privilégiées. Nous ne pouvons donc, à ce stade de l'étude, qu'émettre différentes hypothèses sur le fonctionnement hydrogéologique et les conditions aux limites du système épikarstique drainé par l'émergence du Sas1 :

- Les écoulements ne s'effectueraient que dans les terrains calcaires du Coniacien supérieur. L'aire d'alimentation correspondrait approximativement aux affleurements de ces formations matérialisés par la clôture de protection du site. La paléo falaise localisée en amont de la grotte constituerait une limite à flux nul, considérant que le contraste de perméabilité entre les terrains carbonatés et les sables argileux des remplissages serait trop important pour permettre l'établissement d'un flux significatif.

Dans cette configuration, le comportement attendu de la source du toit du Sas1 serait celui d'un épikarst classique, où la présence des discontinuités hydrauliques entraînerait une forte hétérogénéité hydrochimique, isotopique et thermique des eaux à l'exutoire en fonction des conditions météoriques.

- Les eaux drainées par la source du toit du Sas1 proviendraient à la fois des terrains calcaires du Coniacien supérieur et des formations altéritiques.

Il faudrait alors distinguer les périodes d'étiage où les lentilles sableuses, moins transmissives, alimenteraient les calcaires, des périodes de hautes eaux où ce schéma s'inverserait. Les formations altéritiques présenteraient en effet une inertie plus importante à la recharge et au tarissement que les calcaires du Coniacien. Xu (2015) semble montrer à l'aide d'un suivi temporel en tomographie de résistivité électrique que des connections peuvent se mettre en place entre les calcaires et la formation altéritique au cours des périodes de fortes sollicitations pluvieuses. Cependant, à ce jour, aucun marqueur hydrogéochimique n'a permis de témoigner de cette alimentation de l'émergence du SAS 1 par les sables argileux des altérites Est.

Exfiltrations aux joints stratigraphiques des parois du SAS 2 et de la Salle des Taureaux :

Bien qu'une discontinuité hydraulique soit présente à l'interface entre l'épikarst et les calcaires massifs de la zone de transmission sous-jacents, la présence de fissures dans ces derniers permet à l'eau de poursuivre son cheminement. Ces calcaires plus massifs constituent des bancs homogènes séparés par des joints localement évidés (positionnement en Figure II-22).

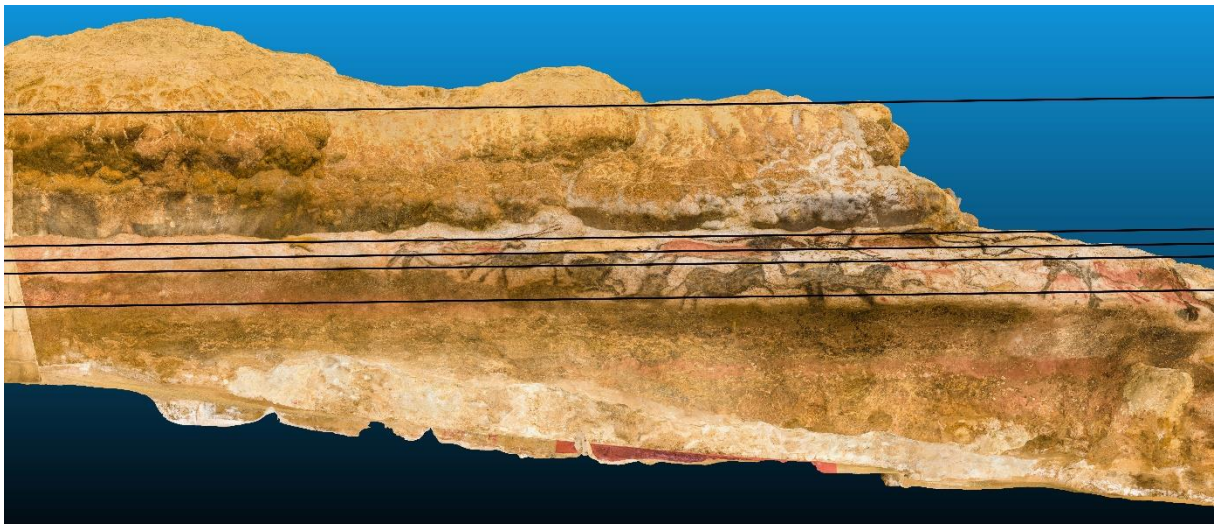


Figure II-22 : Représentation schématique des joints de stratification (traits noirs) présents en paroi gauche de la Salle des Taureaux.

L'eau emprunte ces étroits passages et circule très lentement. D'après Jean Vouvé (1968), elle apparaît avec un décalage variable dans le temps, le long des parois ; il est de trois mois dans la partie médiane du Sas II, 4 à 5 mois pour l'écaille de la Licorne de la Salle des Taureaux, par rapport au début des écoulements enregistrés au Sas 1. Les exfiltrations s'effectuent à la hauteur du premier joint, puis du second et enfin du troisième. Les eaux

émergeant du joint inférieur atteignent le sol, ou tombent parfois goutte à goutte en quelques points particuliers au bas des parois des salles.

Sous ces joints, des écailles rocheuses se sont décollées avant et après le passage des artistes préhistoriques et ont laissé localement la roche à nu. Le restant des parois est quant à lui recouvert de calcite dite secondaire, c'est-à-dire reprécipitée par les exfiltrations. A la périphérie de certaines de ces écailles, les suintements se sont concentrés préférentiellement et sont à l'origine de la genèse de petites stalactites et de bourrelets calciques. Les débits ponctuels extrêmement faibles diffèrent fondamentalement des écoulements au Sas 1. Les suintements restent ponctuels et ne dépassent pas l'entrée du Diverticule Axial.

L'estimation du débit de ces exfiltrations est très délicate car il est impossible de mesurer les flux sortants du fait de leur progression pour partie dans la porosité du substrat. La mesure même de l'épaisseur du film d'eau résultant pose un problème technique en raison de l'hétérogénéité de surface de la roche. Le suivi résulte des informations issues des observations des parois, réalisées par les techniciens de la grotte, et consignées sur les cahiers de bord successifs depuis des années. Plus récemment, les agents de la cavité effectuent un relevé régulier des zones pariétales affectées par les exfiltrations. Un exemple de relevé est présenté en Figure II-23.

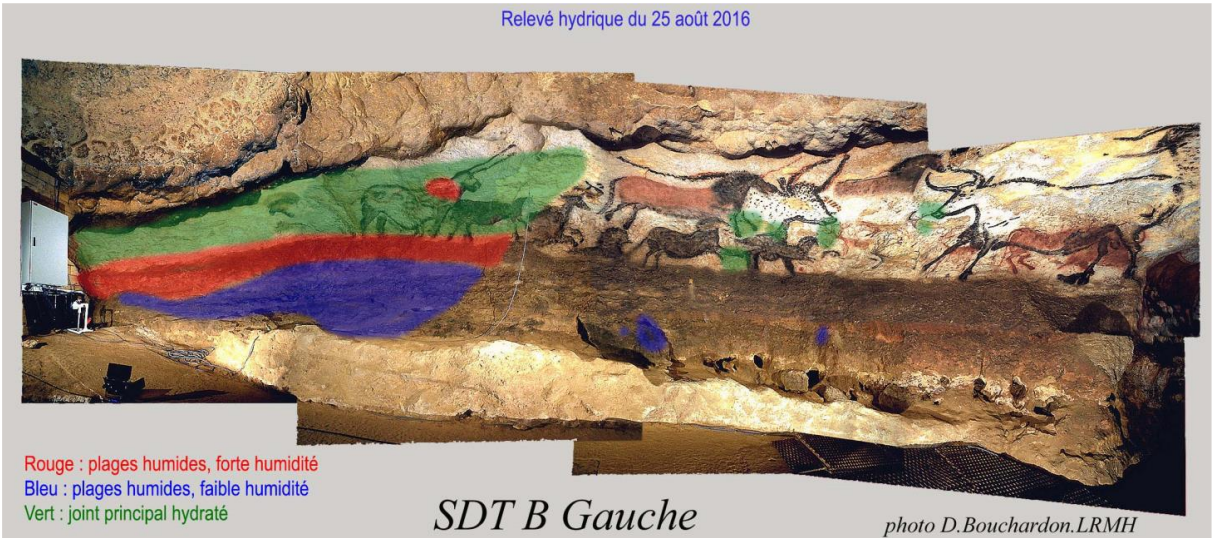


Figure II-23 : Relevé hydrique de la paroi gauche de la Salle des Taureaux au 25 Août 2016. Les plages d'humidité résultent des écoulements venant des joints stratigraphiques.

Ces relevés apportent une information qualitative sur la quantité d'eau présente aux parois ornées de la Salle des Taureaux.

Les autres écoulements dans la cavité :

Trois autres manifestations d'écoulement sont reconnues dans la cavité (Figure II-11). Elles se situent dans la partie terminale du conduit de la partie droite de la grotte aux voûtes de la Galerie Mondmilch et du Cabinet des Félins. Ces écoulements se produisent suite aux fortes sollicitations pluvieuses de Janvier à Avril, c'est-à-dire lorsque les réserves en eau du système sont importantes. Les infiltrations s'infiltrent dans les sols de la Galerie Mondmilch quand celles du Cabinet des Félins rejoignent une zone de soutirage (puits). Parallèlement, des écoulements se produisent brièvement dans la partie sommitale de la Grande Diaclase à 4 m de profondeur par rapport à la surface (zone la moins profonde de la cavité). Ces zones d'écoulement se trouvent au droit de potentielles zones d'infiltration préférentielle reconnues à la surface par Bruxelles et Camus (2014).

II.4 Résumé des principales caractéristiques géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques du site d'étude

L'analyse des nombreuses prospections effectuées sur le site de la grotte de Lascaux depuis le début des années 60 a permis de mieux appréhender les principales caractéristiques géologique, géomorphologique et hydrogéologique du système karstique étudié.

La colline de Lascaux a subi une histoire géologique longue dont découle sa géologie et sa géomorphologie complexe. Ce promontoire du plateau calcaire régional du Crétacé est formé d'une succession de couches de formations carbonatées allant du Coniacien Inférieur marno-calcaire au Santonien inférieur (calcarénites) retrouvé en partie sommitale. Les processus de fantômisation (altération en place) et de crypto-karstification (altération sous couverture) des calcaires du Crétacé moyen et supérieur résulte en la présence de crypto-lapiaz et couloirs de fantômisation profonds (plus de 10 mètres) dans lesquels des formations altéritiques sablo-argileuses sont retrouvées notamment à proximité de la cavité de Lascaux. La présence de ces différentes formations géologiques ainsi que de processus de colluvionnement a contraint la mise en place de différents faciès pédologiques qui conditionnent le développement de différents couverts végétaux (prairie, futaies de châtaigniers, pinède et chênaie). Cette diversité géologique, pédologique et végétale aura certainement un impact important sur les problématiques de cette thèse et notamment l'étude de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst.

Cette grotte de petite taille s'est développée de 4 à 25 mètres de profondeur par des processus de fantômisation et d'altération en contexte épinoyé dans les calcaires Coniacien Supérieur. Cette cavité descendante composée de trois parties différentes ; axiale, droite et Grande Diaclase ; a été profondément remaniées par les différents aménagements réalisés depuis sa découverte. Ces aménagements parmi lesquels, la mise en place de SAS de sécurité

ainsi que de l'extraction de l'air influent de façon directe sur l'aérologie de la cavité et conditionneront donc nos futures interprétations.

Du point de vue de l'hydrogéologie, la colline de Lascaux représente une petite zone d'alimentation des grands aquifères karstiques régionaux et notamment du Turonien. En effet, bien que les calcaires marneux du Coniacien inférieur constituent la base de ce promontoire calcaire, des phénomènes de drainance descendante peuvent permettre l'alimentation de l'aquifère du Turonien sous-jacent par les eaux s'infiltrant à travers ce promontoire. A l'échelle de la colline, quelques petites émergences sont observées. Une de ces sources sera étudiée de façon détaillée au cours de ces travaux de thèse pour déterminer les conditions d'écoulements dans la zone vadose du karst et leur impact sur le marquage hydrogéochimique de ces écoulements. Elle est située sur le versant Nord (la source de la Haute Fageotte) à écoulement pérenne (3 à 20 $m^3 \cdot h^{-1}$) soutenu par un aquifère perché au-dessus des formations plus marneuses. La seconde (émergence du SAS 1) est située dans l'entrée de la cavité de Lascaux à l'interface entre l'épikarst et la zone de transmission. Cet écoulement non pérenne (0 à 25 $m^3 \cdot j^{-1}$) est alimenté par une réserve épikarstique qui se constitue de la fin de l'automne au début de l'été du fait de la discontinuité hydraulique entre les calcaires délités et fracturés de l'épikarst sus-jacent et les bancs de calcaire plus massif de la zone de transmission. Cette émergence sera au centre de notre étude des conditions d'écoulement et de l'acquisition du potentiel de karstification des eaux épikarstiques. Cette réserve est aussi à l'origine d'écoulements lents et retardés retrouvés aux joints stratigraphiques des parois ornées de la Salle des Taureaux. Ces eaux d'exfiltration ont certainement contribué aux différents faciès spéléogéniques observés sur ces parois ornées. La détermination de l'impact potentiel de cet écoulement de fissures sur les supports ornés représente donc une problématique importante de cette étude.

III. La dynamique du dioxyde de carbone dans la zone vadose du karst

Les problématiques scientifiques relatives à l'étude de la dynamique du dioxyde de carbone dans les sols et les massifs sous-jacents sont principalement abordées dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre et plus particulièrement au cours de recherches agronomiques. En effet, ce gaz principalement produits par l'activité humaine et l'utilisation des énergies fossiles, mais aussi par la respiration racinaire et l'oxydation de la matière organique par les micro-organismes présents dans les sols en milieu naturel, est le premier responsable du réchauffement climatique. Ainsi, de nombreuses équipes scientifiques se sont intéressées au cycle du carbone se tenant dans le système atmosphère/subsurface pour déterminer les flux de dioxyde de carbone produits par les sols, mais aussi la quantité de carbone que les sols peuvent stocker. En parallèle, la dynamique du dioxyde de carbone est au centre des intérêts d'autres équipes scientifiques travaillant sur le stockage du CO_2 dans les zones profondes des massifs rocheux, solution envisagée pour diminuer la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. En effet, à travers la géologie du massif et l'étude des processus de transfert de ce gaz dans le massif en cas de fuite dans l'encaissant, de nombreux laboratoires de recherche ont conduit des études sur ce sujet primordial au cours des dernières années. Cependant, ces derniers se heurtent à la question suivante : comment distinguer une augmentation naturelle de la teneur en CO_2 dans le massif d'une augmentation due à une fuite du réservoir de CO_2 souterrain ? Dans cet optique, la compréhension de la dynamique de ce gaz dans les massifs rocheux, qu'ils soient fissurés ou karstiques, doit être améliorée.

Dans le domaine de l'hydrogéologie karstique, le CO_2 est comme nous l'avons vu précédemment, un paramètre important dans l'acquisition du potentiel de karstification des eaux s'infiltrant dans les massifs karstiques. Il est donc à l'origine de la minéralisation des eaux dans le système karstique au cours de leur infiltration, et conditionne donc en partie le chimisme des eaux arrivant aux exutoires, souvent exploités pour fournir de l'eau potable. Parallèlement, la compréhension de cette dynamique peut revêtir un intérêt tout particulier pour comprendre la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans les cavités karstiques qui peuvent comme c'est le cas de la Grotte de Lascaux, renfermer des vestiges des temps passés.

Cette problématique a été longuement étudiée par différentes équipes au cours des 50 dernières années. Cependant, ces dernières se sont heurtées au manque de données concernant les teneurs en CO_2 dans les massifs karstiques et ont donc dû aborder la compréhension la dynamique de manière indirecte à travers la variabilité des signaux géochimiques des eaux arrivant à l'exutoire. Lopez (2009) aborde tout de même cette problématique en réalisant un suivi ponctuel des teneurs en CO_2 dans les formations sablo-argileuses présentes sur le site de Lascaux, ainsi qu'un suivi en continu des teneurs en CO_2 à 3 mètres de profondeur dans les

calcaires épikarstiques et ces mêmes formations détritiques. Cependant, le manque de données concernant les paramètres pouvant impacter la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans le massif ainsi que la méthode de mesure basée sur le pompage de l'atmosphère du massif n'ont pas permis à l'auteur d'expliquer les processus de cette dynamique.

Nous proposons donc dans ce chapitre de mieux apprécier la dynamique du CO_2 et donc les mécanismes responsables de la répartition spatio-temporelle de ce gaz dans le massif karstique de la colline de Lascaux. Pour cela, une parcelle expérimentale a été instrumentée développée et implantée à distance raisonnable de la cavité de Lascaux. Les mesures en continu in-situ des teneurs en CO_2 mais aussi des paramètres hydroclimatiques (températures, teneurs en eau, pression d'eau et pression atmosphérique) influençant ces teneurs en CO_2 sont effectuées à différentes profondeurs dans l'épikarst et les formations détritiques. Il est important de préciser que l'originalité de cette démarche réside dans la technique de mesure des teneurs en CO_2 du massif. En effet, ces dernières sont effectuées in-situ par un capteur NDIR (Non Dispersive Infra Red sensor) permettant de s'affranchir de pompage et donc de déterminer avec précision la teneur en CO_2 à différentes profondeur dans le massif sans qu'une sonde ne perturbe les autres. En parallèle, des mesures isotopiques du carbone du CO_2 ($\delta^{13}C_{CO2}$) sont réalisées tout au long de l'étude dans les différents forages instrumentés pour déterminer d'une part l'origine du CO_2, mais aussi les mécanismes d'échanges entre l'atmosphère et le massif, phénomènes pouvant impacter la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans le massif.

L'étude des nombreuses mesures acquises au cours de deux années de monitoring permet de déterminer la répartition spatio-temporelle du dioxyde de carbone dans l'épikarst et les formations détritiques qui lui sont associées sur le site de Lascaux. La compréhension des phénomènes hydroclimatiques responsables de la variabilité spatiale et temporelle de ces teneurs en CO_2, permet alors de construire un schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst de la colline de Lascaux. En outre, cette étude apporte des explications concrètes quant aux fortes concentrations de CO_2 mesurées en profondeur dans le massif karstique, bien supérieures à celles présentes dans les sols, principales zones de production du CO_2.

Pour cela, cette partie est articulée autour de trois sous-parties avec tout d'abord un état de l'art des études du CO_2 dans les sols et les massifs rocheux sous-jacents, qu'ils soient karstifiés ou non, puis une description détaillée de la parcelle expérimentale et de son instrumentation, et enfin des résultats obtenus au cours de ces trois années de thèse.

III.1 Etat de l'art sur l'étude de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst

Les processus de production et de transport de CO_2 dans les sols et le massif ainsi que le signal isotopique de ce CO_2 sont abordés avant de détailler les différents paramètres et phénomènes physico-chimiques pouvant les influencer. Les principaux modèles existants décrivant les échanges de CO_2 entre le massif et l'atmosphère seront ensuite présentés avant de s'intéresser plus particulièrement aux connaissances déjà acquises sur le site de la cavité de Lascaux.

III.1.1 Le CO_2 dans les sols et la zone vadose sous-jacente

Comme mentionné précédemment, le CO_2 fait partie intégrante du cycle du carbone s'établissant entre l'atmosphère externe et les sols (Figure III-1).

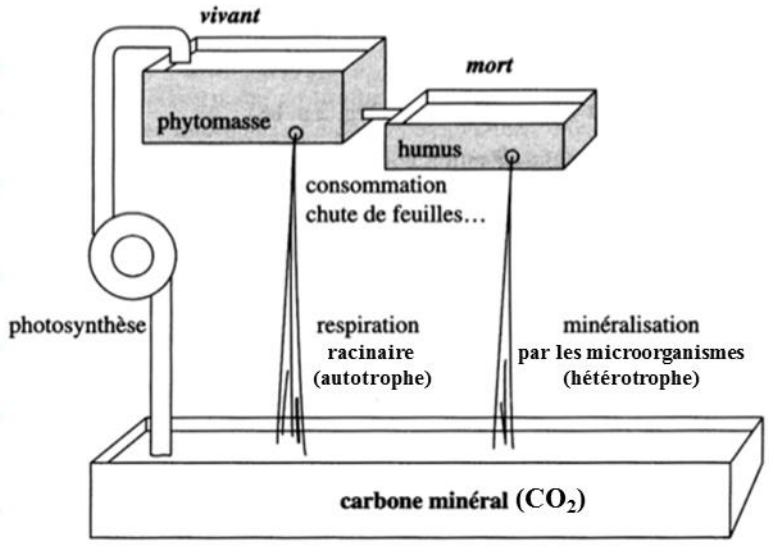


Figure III-1 : Cycle du carbone organique dans un système forestier (modifiée d'après Henri Jupin, Hachette, 1996)

Le CO_2 présent dans la zone vadose des massifs karstiques peut avoir plusieurs origines différentes que sont :

- le CO_2 atmosphérique présent à des concentrations de l'ordre de 400 ppm (parties par millions),
- le CO_2 provenant du dégazage des eaux présentes dans le milieu,
- le CO_2 d'origine profonde remontant au travers de différents accidents géologiques,
- le CO_2 provenant de la respiration racinaire dont le siège est principalement localisé dans les horizons superficiels du sol,

- le CO_2 provenant de la dégradation de la matière organique par les microorganismes. Les sièges de ce processus sont le sol mais aussi les aquifères karstiques dans lesquels les bactéries peuvent oxyder la matière organique dissoute comme l'ont montré Benavente et al. (2010).

Le contexte hydrogéologique de la zone vadose de la colline de Lascaux permet d'affirmer que les remontés de CO_2 profonds ainsi que la dégradation de la matière organique dissoute dans les eaux d'infiltration sont absentes ou participent de manière extrêmement minoritaire par rapport aux trois autres sources de CO_2. La quantité de CO_2 présente dans les différentes couches est alors soumise à deux facteurs que sont les flux de production et de transport comme le montre l'équation 2 (Simunek et *al.*, 1993 ; Fang et *al.*, 1999) :

$$\frac{\delta C_T}{\delta t} = -\frac{\delta F}{\delta z} + S \qquad (2)$$

où C_T est la concentration totale en CO_2 à une profondeur z et à un instant donné (mmol CO_2 m^{-3}), δCt est le taux de stockage/prélèvement du CO_2. F représente les flux de CO_2 (mmol CO_2 $m^{-2}.s^{-1}$) engendrés par les processus de transport et émis selon la direction z, S est un coefficient qui prend en compte les éventuelles sources ou pertes de CO_2 (mmol $CO_2.m^{-3}.s^{-1}$).

Il convient donc de se focaliser aussi bien sur les processus de production de ce gaz, que sur les mécanismes de transfert pour comprendre la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst.

III.1.1.1 Le processus de photosynthèse : fixateur du carbone minéral atmosphérique

La photosynthèse permet aux plantes de capter le carbone inorganique de l'atmosphère (CO_2) afin de synthétiser des molécules organiques (glucides). Ce processus biochimique utilise la partie visible du rayonnement solaire (400 nm à 700 nm) représentant environ la moitié de la radiation totale (Waring et Schlesinger, 1985). La fraction de ce rayonnement visible absorbée par la plante est d'environ 85 %, mais cette proportion varie selon l'âge et la structure des tissus foliaires. Enfin, il nous faut considérer que seulement 5 % de l'énergie absorbée va être utilisée par la photosynthèse, le reste étant perdu en chaleur (Salisbury et Ross, 1978). L'équation 3 décrit ce processus biochimique :

$$CO_2 + 2H_2O + UV \rightarrow (CH_2O) + O_2 + H_2O \quad (3)$$

La plus grande partie de la photosynthèse s'effectue dans le feuillage mais les tiges et branches y participent aussi de manière plus modeste (Waring et Schlesinger, 1985). L'écorce, les cotylédons, les bourgeons et les fruits en font de même (Kozlowski et al., 1991).

Le taux de photosynthèse est différent selon les espèces, le type de feuille, la période de la journée et la saison de croissance. Ces variations dépendent de relations entre des facteurs physiologiques comme l'âge, la structure et l'exposition des feuilles, le développement de la cime, le comportement des stomates, la quantité et l'activité de Rubisco (ribulose biphosphate carboxylase- oxygénase) et les facteurs environnementaux comme l'intensité de la lumière, la concentration atmosphérique de CO_2 et des polluants atmosphériques, la disponibilité de l'eau, la température et les caractéristiques du sol (Heatherton et al., 1991). Par exemple, Nelson et al., (1984) montre que les arbres ont des taux de photosynthèse nette semblables à ceux de plantes agricoles et de plantes herbacées (Tableau III-1).

Tableau III-1: Taux de photosynthèse net de plantes agricoles, herbacées et d'arbres soumis à des conditions de croissance favorables (Nelson et al., 1984)

TYPE DE PLANTES	ESPÈCES OU HYBRIDES	CAPTAGE DE CO_2 (g CO_2 g-1 de feuillage s-1)
Plantes agricoles		8,34 à 16,68
Plantes herbacées		8,34 à 22,24
Feuillues	*Populus deltoides* x *Populus nigra*	12,30
	Salix (quelques espèces)	13,51 à 17,24
Résineux	*Pinus sylvestris*	9,73 à 10,52
	Pinus rigida[2]	14,46
	Pinus taeda[2]	11,11
	Pseudotsuga menziesii	9,73

Ce processus permet donc la fixation du carbone atmosphérique par les organismes végétaux. Cette fixation entrainant la production de matière organique végétale (production primaire) qui constitue la grande majorité du stock de matière organique présent dans les sols.

III.1.1.2 La production du CO_2 dans les sols : fixation du carbone atmosphérique et respirations autotrophe et hétérotrophe.

La respiration hétérotrophe constitue avec la respiration autotrophe du sol, les deux sources biogéniques de CO_2 du sol. Le terme hétérotrophe sous-entend que l'organisme utilise une source de carbone provenant d'autres organismes morts quand le terme autotrophe induit

que l'organisme utilise ses propres réserves en carbone. La respiration totale du sol est donc la somme de ces deux composantes de production, auxquelles il faut ajouter le transport du CO_2 (Luo *et al.,* 2006) qui peut apporter du CO_2 venant d'horizons adjacents (sous ou sus-jacents).

III.1.1.2.1 La respiration autotrophe dans les sols

Au cours du XX^{ème} siècle, il a été montré que la respiration des végétaux se fait aussi dans les tissus racinaires, ce qui remit en question le fait que la respiration ne se faisait que dans les tissus en croissance. Ainsi, la respiration autotrophe du sol est due à la respiration des tissus racinaires et des micro-organismes de la rhizosphère (champignons mycorhiziens, bactéries associées) qui consomment le carbone alloué par l'arbre et produisent du CO_2. En effet, la plus grande partie des molécules carbonées produites par la photosynthèse sont simultanément réutilisées par la respiration.

La respiration regroupe les processus biochimiques grâce auxquels les molécules d'un substrat sont oxydées pour donner des molécules essentielles au fonctionnement et à la croissance d'un organisme (ATP, NADP, *etc.*). Sa part dans l'utilisation journalière des produits de la photosynthèse, variable selon les espèces et la nutrition azotée de l'organisme, est estimée entre 10 et 50%. En effet, ce processus est très faible dans les tissus en dormance alors qu'il est important dans les tissus en croissance (Heatherton et al., 1991). La respiration se résume par l'équation 4 :

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow 6CO_2 + H_2O + énergie \quad (4)$$

Wang & Yang (2007) estiment qu'elle représente 50 à 80 % de la production totale de CO_2 dans les sols de six forêts tempérées en Chine, le restant provenant de la respiration hétérotrophe. Cependant, ces valeurs semblent difficiles à vérifier sur notre site. En effet, si la respiration racinaire peut être estimée de manière précise en laboratoire (par exemple en solution nutritive), cette mesure sur le terrain est très difficile à mettre en place du fait des variations des conditions environnementales. On entrevoit alors déjà les difficultés que l'on peut rencontrer pour modéliser ce phénomène biochimique. Des modèles existent pourtant (Simunek et *al.,* 1993 ; Perrin, 2005 ; Vargas et *al.*, 2010 ; Latimer et Risk, 2016), mais ils reposent en premier lieu sur des paramètres empiriques inhérents à chaque site. En effet, ce processus de production de CO_2 peut être affecté par de nombreux paramètres tels que la teneur en eau et la température du sol, mais aussi la diversité microbienne, la disponibilité en nutriments azotés ou encore l'état de croissance des végétaux. Zhou et al., (2007) ont montré

que les racines fines, principales productrices de CO_2 ne sont pas présentes dans les mêmes proportions selon la profondeur.

III.1.1.2.2 La respiration hétérotrophe dans les sols

Dans les sols, la respiration hétérotrophe est le processus de décomposition de la litière (résidus de cultures en sol agricole) et de la matière organique du sol sous l'action des micro-organismes saprophytiques non liés au système racinaire des végétaux (bactéries, champignons, actinomycètes) (Wardle & Lavelle., 1997) et de la macrofaune du sol (invertébrés macroscopiques, petits mammifères). Ainsi, en milieu oxygéné, l'absorption et la dégradation du substrat par les micro-organismes produisent du CO_2 par une réaction d'oxydation de la matière organique utilisant l'oxygène comme accepteur d'électron (équation 4).

La diversité des communautés microbiennes (Rousk *et al.*, 2007) et la cinétique d'intervention des différentes espèces de micro-organismes sont affectées par la composition biochimique des résidus des végétaux. De plus, les enzymes produites par les micro-organismes participent activement à la dégradation des composés organiques du sol (Aon et al., 2001). Ces enzymes libérées dans le sol vont se lier aux particules minérales par des forces électrostatiques, ioniques, covalentes, *etc*. Leur action dans le sol dépend de la température mais aussi des propriétés du substrat inorganique auquel elles se lient (Huang et al., 2005). Ainsi, la dégradation et donc la stabilité des molécules organiques sont contrôlées par leurs structures chimiques et par la protection que peut lui conférer la matrice du sol (Baldock et al., 2000).

Environ 80 % des micro-organismes du sol ne sont pas actifs et ne participent donc pas aux processus de dégradation (Stenström *et al.,* 2001 ; Fontaine *et al.,* 2003). Cependant, l'apport de matière organique fraîche au sol ainsi qu'une augmentation de la température ou de l'humidité conduisent au réveil de ces organismes en dormance : c'est le « *priming effect* » (Fontaine *et al.,* 2003). Une augmentation de la teneur en eau du sol suite à des épisodes pluvieux peut donc conduire à une augmentation de la production de CO_2 dans les sols. La quasi-totalité des études récentes admettent que la température du sol influe sur la respiration hétérotrophe et donc sur l'activité biologique. En effet, Kätterer et al., (1998) montrent que le Q10 (facteur par lequel le taux de respiration est multiplié pour une augmentation de la température de 10 °C) est de deux. Cependant, Davidson & Janssens, (2006) affirment que le Q10 n'est égal à deux que dans certaines conditions et selon les caractéristiques du substrat. La macrofaune a une importance primordiale dans la détérioration de la matière organique et donc dans l'accessibilité de cette dernière pour les micro-organismes. Ainsi, elle a un impact direct sur la production de CO_2 et sur sa circulation par son action sur la structure du sol qui rend plus

ou moins accessible la matière organique aux organismes la dégradant. A cela, il faut ajouter que cette macrofaune a elle aussi une distribution verticale non homogène. En effet, ces organismes se concentrent sur les cinq premiers centimètres et sont quasiment absents en dessous de dix centimètres. La densité de la macrofaune dépend aussi d'autres facteurs que sont la texture du sol, la température, la disponibilité en eau et en matière organique mais aussi du pH.

En résumé, la compréhension du mécanisme de respiration hétérotrophe est complexe car ce processus est affecté par de nombreux facteurs que sont la complexité du sol, les interactions entre les différentes composantes mais aussi la température, le pH, la disponibilité en oxygène et l'humidité du sol (Huang et *al.*, 2005). Le CO_2 produit dans les sols par les deux composantes de la respiration, va alors pouvoir être entrainé suivant divers mécanismes de transfert vers les horizons sous-jacents ou vers l'atmosphère.

III.1.1.3 Le transport du CO_2 dans les sols et les massifs rocheux fracturés ou karstifiés

Le transport d'une espèce chimique dans un sol ou une roche a lieu soit par advection sous l'effet d'un gradient de température, soit par diffusion sous l'effet d'un gradient de concentration. Les roches, et en particulier les roches carbonatées de l'épikarst de la colline de Lascaux, sont des systèmes hétérogènes complexes, où l'écoulement des fluides (air ou eau) a lieu préférentiellement dans les structures conductrices de type fractures, dont certaines sont connectées, et qui constituent des réseaux de drainage. Dans le reste de la roche, la matrice, un écoulement beaucoup plus lent des fluides a lieu dans le réseau des pores. La densité du réseau des fractures et la connectivité entre les fractures contrôlent ainsi les écoulements de fluides. La contribution du transport de CO_2 en phase liquide n'est significative que dans des conditions bien particulières (sol et roche proches de la saturation) peu fréquentes en présence d'un couvert forestier et dans les roches épikarstiques superficielles, mise à part dans les périodes de fortes sollicitations pluvieuses. Cependant, les fronts d'infiltration peuvent entrainer le CO_2 sous forme gazeuse vers les horizons plus profonds, ou encore chasser ce gaz du massif vers l'atmosphère.

III.1.1.3.1 Le transport par diffusion

Le moteur du transport diffusif est le gradient de concentration. La diffusion du CO_2 dans le sol obéit à la première loi de Fick (Fang et al., 1999 ; Jassal et al., 2004 ; Pumpanen et al., 2008). Le flux diffusif (J_{Az} en $mol.m^{-2}.s^{-1}$) est dès lors proportionnel au gradient de concentration et au coefficient de diffusivité du CO_2 du sol, comme le montre l'équation 5 :

$$J_{Az} = -D_{AB} * \frac{\delta C_A}{\delta z} \quad (5)$$

Où D_{AB} est le coefficient de diffusion du gaz ($m^2.s^{-1}$), C_A la concentration du gaz ($mol.m^{-3}$) et z la profondeur (m).

Le gradient vertical des concentrations en CO_2, peut être très fort du fait de la grande variation des valeurs de concentration en CO_2 selon la profondeur. En effet, la concentration augmente dans la majeure partie des cas avec la profondeur comme le montre Luo et Zhou , (2006). Ce gradient dépend de la production de CO_2 le long du profil et les échanges avec l'atmosphère extérieure.

Plusieurs équations expriment le coefficient de diffusion sont utilisées dans les différentes études de modélisation du transport du CO_2 dans les sols. Les plus connues sont celles de Penman (1940), Milligton et al., (1961), Moldrup et al., (1997), Moldrup et al., (1999) et Moldrup et al., (2000). Toutes ces équations utilisent les paramètres intrinsèques du sol comme la porosité efficace ou la teneur en eau.

III.1.1.3.2 Le transport par advection

L'écoulement laminaire d'un fluide newtonien (ici eau ou air) dans un milieu poreux sous l'effet des gradients de pression est décrit par la loi de Darcy (De Marsily, 1986) et l'équation 6 :

$$F = -k * \frac{k_r * \rho}{\mu} * (\nabla P - \rho * g) \quad (6)$$

Où F est le flux massique en $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, k la perméabilité intrinsèque de la roche en m^2, kr la perméabilité relative à la phase étudiée comprise entre 0 et 1, P la pression dans la phase en Pa, ρ la masse volumique du fluide en $kg.m^{-3}$, μ sa viscosité dynamique en Pa.s et g l'accélération de la pesanteur en $m.s^{-2}$. Pour simplifier, on considère ici un milieu isotrope homogène, dans lequel la perméabilité est constante, et ne dépend pas de la direction de l'écoulement. Dans un milieu fracturé comme c'est le cas de l'épikarst de Lascaux, l'écoulement peu avoir lieu dans les réseaux de fractures en considérant la matrice comme imperméable. L'écoulement de fluide dans une fracture d'ouverture c (m) est donnée par la loi de Poiseuille, permettant ainsi de déterminer une perméabilité de la roche selon l'équation 7 (Koudina et al., 1998) :

$$k_{frac} = \frac{c^2}{12} \quad (7)$$

III.1.2 Le signal isotopique du CO_2 de l'air du sol et du massif :

Le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C$ –CO_2) permet de déterminer l'origine du CO_2 présent dans le système étudié, mais aussi de déterminer les processus de transfert et de mélange entre les masses d'air contenant du CO_2 ayant un marquage isotopique différent (exemple : mélange CO_2 atmosphérique, CO_2 respiration du sol). L'utilisation du carbone 13 nécessite un rappel des définitions des paramètres tels que le rapport isotopique, le fractionnement isotopique et le $\delta^{13}C$. Il est pertinent de proposer ici un rappel des définitions afin de mieux appréhender par la suite les relations présentées. Nous proposons une synthèse des processus de fractionnement isotopique et les conséquences de ces mécanismes sur la composition isotopique du CO_2 présent dans la zone vadose.

III.1.2.1 Définition de la composition isotopique :

Le carbone possède deux isotopes stables, le ^{13}C et le ^{12}C beaucoup plus abondant dans notre environnement que le premier. Un composé est caractérisé par son rapport isotopique c'est-à-dire du rapport entre le nombre de molécule de ^{13}C et de ^{12}C (équation 8) :

$$R = \frac{^{13}C}{^{12}C} \quad (8)$$

Dans la littérature, la composition isotopique ($\delta^{13}C$ en ‰) est définie par l'équation 9 :

$$\delta^{13}C = \left(\frac{R_{éch}}{R_{std}} - 1\right) * 1000 \quad (9)$$

Avec, $R_{éch}$, le rapport isotopique de l'échantillon et R_{std}, le rapport isotopique du standard international (rostre d'un Bélemnite de la formation de Pee Dee, Caroline du Sud, USA). La notation conventionnelle est VPDB, soit « Vienna Pee Dee Belemnite ». Le rostre de Bélemnite représente la matrice des carbonates. A titre d'exemple, la composition isotopique du carbone atmosphérique est bien différente de celle des plantes (Tableau III-2).

Tableau III-2 : Composition isotopique de différents réservoirs de carbone (Ghashghaie et al., 2001).

Réservoir	**Composition isotopique moyenne (‰)**
Atmosphère	-8.6
Plante C3	-27.0
Plante C4	-11.0

Les plantes en C3 et C4 diffèrent selon leur mécanisme de fixation du CO_2 atmosphérique au cours du processus de photosynthèse. Dans les zones forestières des régions tempérées, les plantes en C3 représentent la quasi-totalité de la végétation (les plantes C4 étant plutôt présentes sous les tropiques). De cette différence résulte un phénomène de discrimination isotopique différent, également appelé fractionnement, entre les molécules contenant du ^{12}C et du ^{13}C.

III.1.2.2 Fractionnement isotopique du CO_2 dans les sols :

De manière générale, la discrimination isotopique est définie comme un changement de composition isotopique lors d'un processus. Le rapport isotopique est rarement le même entre les espèces contenant du carbone. La comparaison des rapports isotopiques de deux espèces, A et B contenant du carbone introduit la notion de « facteur de fractionnement », noté α et défini par l'équation 10 :

$$\propto_{B/A} = \frac{^{13}RB}{^{13}RA} = \frac{^{13}CB * ^{12}CA}{^{13}CA * ^{12}CB} \qquad (10)$$

Où $^{13}R_A$ et $^{13}R_B$ sont les rapports isotopiques des composés A et B.

La notation du facteur de fractionnement est assez variable dans la littérature :

- α_{BA} par Emrich et al. 1970,
- $\alpha_{A(B)}$ par Mook et al. 1974,
- $\alpha_{B/A}$ par Mariotti, 1991,
- $\alpha_{B\text{-}A}$ par Clark et Fritz, 1997.

Nous utiliserons la notation, proposée par l'AIEA (2008) « $\alpha_{B/A}$ » qui doit être énoncée « facteur de fractionnement de B par rapport à A ». Cette notation minimise la confusion

possible pour la définition de l'espèce présente au dénominateur. La valeur de α est très proche de 1, aussi il apparaît plus intéressant de considérer la déviation de α par rapport à 1. Ainsi ε est défini par l'équation (11) le « fractionnement isotopique » :

$$\varepsilon_{B/A} = \alpha_{B/A} - 1 \qquad (11)$$

Le comportement physico-chimique du ^{13}C et du ^{12}C n'est pas strictement identique. Le passage d'une espèce A vers une espèce B des atomes de carbone peut privilégier ou défavoriser le transfert de l'isotope lourd (c'est-à-dire ^{13}C) ce qui est à l'origine du fractionnement. Lors du fractionnement à la suite du passage d'une portion de A vers B, le rapport isotopique dans B évolue selon trois hypothèses présentées dans la Figure III-2 :

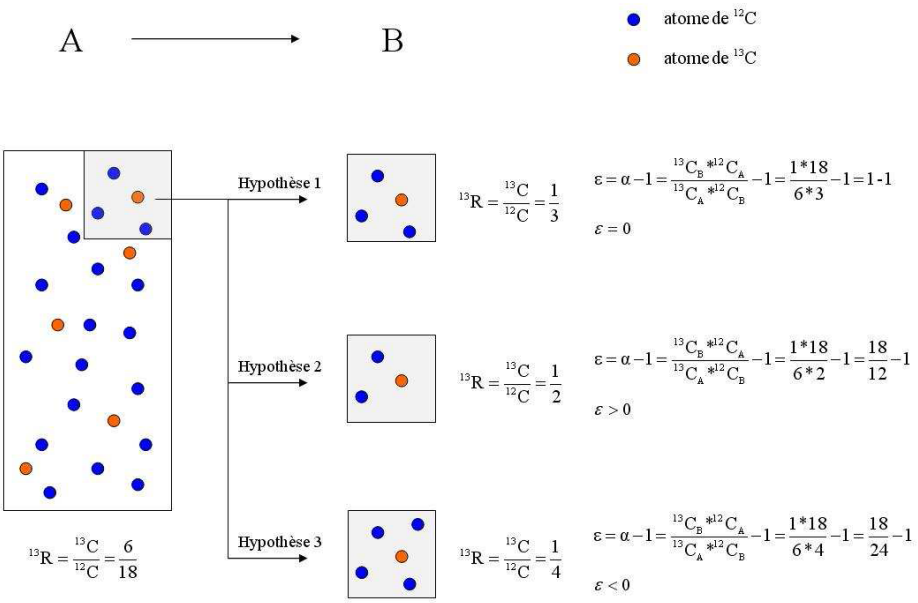


Figure III-2 : Schéma simplifié du fractionnement isotopique du carbone lors du passage du composé A au B. Hypothèse 1 : fractionnement nul. Hypothèse 2 : enrichissement en 13C. Hypothèse 3 : appauvrissement en 13C (Peyraube, 2012).

Dans notre cas d'étude, le fractionnement isotopique est impliqué dans les processus suivants :

- la photosynthèse et la respiration autotrophe du sol,
- la respiration hétérotrophe du sol,
- le transport du CO_2,
- le dégazage des eaux dans les sols et la zone vadose.

III.1.2.2.1 Fractionnement lié à la photosynthèse et à la composante autotrophe

Tout d'abord, avant de nous intéresser à la discrimination liée à la composante autotrophe, il nous faut nous pencher sur la discrimination liée à l'assimilation par la photosynthèse du carbone atmosphérique. En effet, les végétaux discriminent le ^{13}C en utilisant en majorité le CO_2 comprenant un ^{12}C du fait de transfert plus simple à travers les stomates et la carboxylation. Il en résulte que la plante est appauvrie en ^{13}C comparativement au CO_2 de l'air (Farquhar et al., 1989). Il ne faut pas perdre de vue que cette discrimination varie au cours du temps. En effet, lors d'une sécheresse provoquant la fermeture des stomates, la discrimination photosynthétique va diminuer en conséquence de la diminution de potentiel osmotique. Il s'ensuit que la biomasse foliaire ainsi que les sucres foliaires sont moins appauvris en ^{13}C (Bowling et al., 2008). De plus, la production de composés organiques à partir du carbone fixé lors de l'activité photosynthétique va impliquer une chaine de réaction biochimique pouvant provoquer une discrimination isotopique. On parle alors de discrimination post-photosynthétique. D'après Bowling et al., (2008), cette dernière provoque l'apparition d'un delta ^{13}C spécifique à chaque espèce biochimique synthétisée par la plante. Par exemple, ils montrent que le saccharose et l'amidon sont enrichis en ^{13}C par rapport à la biomasse foliaire et que la lignine et les lipides en sont appauvris.

Le fractionnement lié à la composante autotrophe proprement dite reste sujet à contradictions. En effet, certaines considèrent que le fractionnement isotopique n'est pas présent au cours de la production du CO_2 (Lin et *al.,* 1997 ; Ekblad et *al.,* 2001), alors que d'autres considèrent un fractionnement isotopique au cours de la production (Duranceau et *al.,* 1999 ; Ghashghaie et *al.,* 2001 ; Bathellier et *al.,* 2008). Pour Bowling et al., (2008), la respiration des racines est significativement appauvrie en ^{13}C par rapport à la biomasse foliaire, même si le mécanisme responsable de cet appauvrissement demeure inconnu. Ceci étant notamment dû aux multiples processus impliqués et à la difficulté de définir le substrat respiré (sucre, amidon, *etc.*).

III.1.2.2.2 Fractionnement lié à la composante hétérotrophe

Contrairement au fractionnement lié à la composante autotrophe qui est dit direct, la discrimination isotopique au cours du processus de décomposition de la matière organique par les micro-organismes est dite indirecte. Cet effet indirect est provoqué par l'utilisation préférentielle d'un type de substrat (sucres, celluloses) par rapport à un second (lignines, lipides) de composition isotopique distincte (Blagodatskaya et al., 2010 ; Epron et al., 2011). Ainsi, pour mieux apprécier ce processus de fractionnement isotopique, il est essentiel de

comprendre comment la composition isotopique de la matière organique évolue dans les sols et quels sont les facteurs l'influençant.

La composition isotopique du carbone organique du sol résulte de plusieurs facteurs que sont la qualité du matériel initial (Agren et al., 1996), le degré de la dégradation et de la nature des décomposeurs (Blair et al., 1985). Dans le sol, le ^{12}C tend à être pris préférentiellement par les microorganismes pendant la décomposition (Blair et al., 1985). Ainsi, le carbone organique et le CO_2 produits pendant les premiers stades de la dégradation des chaines organiques carbonées sont appauvris en ^{13}C par rapport au produit initial. A contrario, la matière organique résiduelle est enrichie en ^{13}C (Billings et Richter, 2006). Le CO_2 du sol résultant de la dégradation de ce pool de matière organique aura alors une composition isotopique analogue à celle de cette dernière et sera donc plus enrichit en ^{13}C (Crow et al., 2006). Agren et al., observent dans leur étude de 1996 que l'enrichissement en ^{13}C du CO_2 produit à différentes profondeurs dans les sols, est différent selon le couvert végétal présent sur les sols comme le montre la Figure III-3.

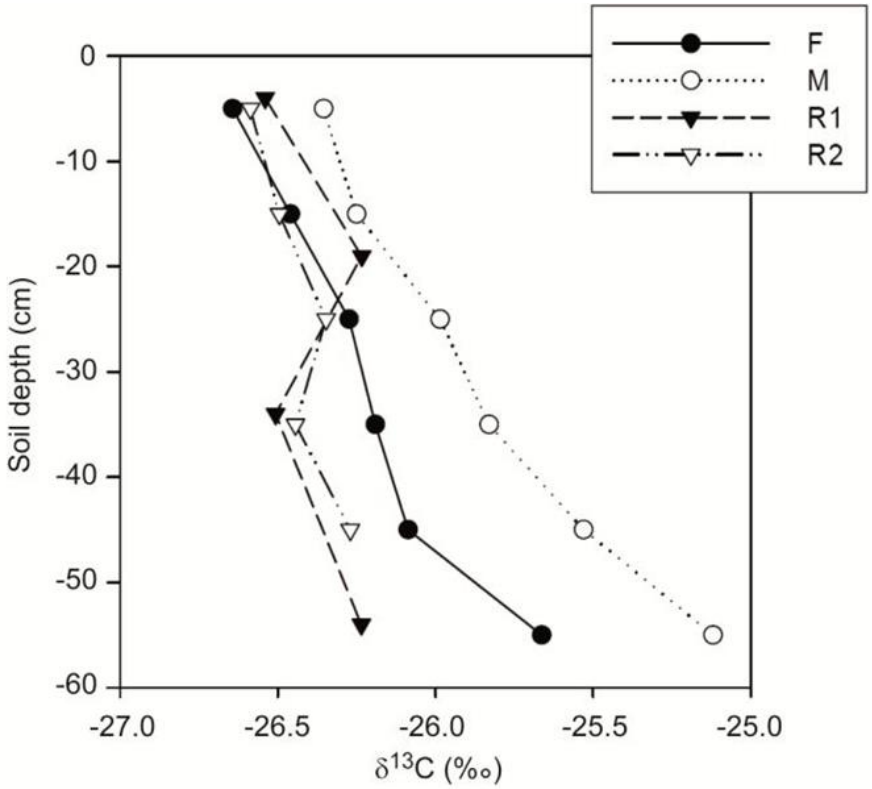


Figure III-3 : Le profil du $\delta^{13}C$ du CO_2 dans les sols selon la couverture végétale F: feuillus, R1 and R2: conifères, M: conifères et feuillus (Linglois 2003).

La composition isotopique du CO_2 produit par ce processus biochimique dépendra donc de deux facteurs :

- Le réservoir organique d'origine de la matière organique morte qui sera dégradée,

- Le stade de décomposition du pool de matière organique morte oxydée par les microorganismes,
- Le couvert végétal,
- La profondeur.

III.1.2.2.3 Fractionnement lié aux processus de transport du CO_2

La production de CO_2 par les plantes est considérée comme majoritaire et le $\delta^{13}C_{CO2}$ du sol lui est très lié. Cependant celui-ci est enrichi par rapport à celui produit par les plantes en conséquence de coefficients de diffusion différents pour le ^{12}C et le ^{13}C du fait de leur masse atomique différente (Cerling et al. 1991). Cet enrichissement a été estimé à 4‰ par Dörr et Munich (1986), 4,4‰ par Cerling et al. (1991) et entre 4‰ et 5‰ par Davidson (1995). Ainsi, le flux de CO_2 sortant du sol vers l'atmosphère suite à la diffusion sera appauvri en ^{13}C par rapport au CO_2 du sol. A contrario, le transfert par advection suite à des variations de la pression atmosphérique ne produit pas de fractionnement particulier étant donné que toute la masse d'air est mise en mouvement. Clark et Fritz (1997) proposent alors une valeur moyenne de -23‰. Cependant les mesures effectuées par Emblanch (1997) puis par Batiot (2002) sont plus proches de -22‰. Lopez (2009) mesure -22,05‰ dans les sols sur le site de la grotte de Lascaux.

III.1.3 Etat des connaissances sur la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst :

Avant de présenter nos travaux relatifs à cette problématique, il s'avère important de reprendre les conclusions mises en lumière par les différentes équipes scientifiques aillant fait de ce sujet un objet privilégié de leurs recherches. Ainsi, cette partie listera les connaissances acquises à Lascaux depuis la deuxième moitié du siècle dernier pour ensuite se focaliser sur les dernières avancées scientifiques réalisées dans ce domaine. Cette étape est importante tant ce sont ces connaissances qui nous ont permis d'axer nos recherches.

III.1.3.1 Le cas de la zone vadose de la colline de Lascaux

Les travaux réalisés par Vouvé (1968) sur les teneurs en CO_2 de l'atmosphère de la cavité et des formations environnantes indiquaient déjà des pressions partielles de CO_2 (PCO_2) élevées dans les formations détritiques sablo-argileuses autrefois attribuées à des processus de comblement. Parallèlement, en effectuant des sondages carottés dans les formations calcaires présentes sur le site, il observait des arrivées d'air chargées en CO_2 (1.5%) à travers certaines fractures. L'auteur introduisait alors le terme de « gazosphère » pour décrire la zone du massif fortement chargée en CO_2. A l'inverse, il notait des teneurs plus faibles dans les sols

pédologiques du promontoire calcaire dans lequel se développe la grotte ornée. Partant de ce postulat, Lopez (2009) s'est attaché à construire un modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose de la cavité de Lascaux, et plus particulièrement dans les formations détritiques sablo-argileuses ainsi que les sols et calcaires épikarstiques. Pour cela, il effectue des suivis plus ou moins réguliers dans une quinzaine de pénétromètres tubés (P) situés dans les altérites et au-dessus des calcaires épikarstiques.

Les résultats obtenus dans les pénétromètres par LOPEZ (2009) au cours des mesures réalisées lors du cycle 2006/2007 sont présentés dans la Figure III-4.

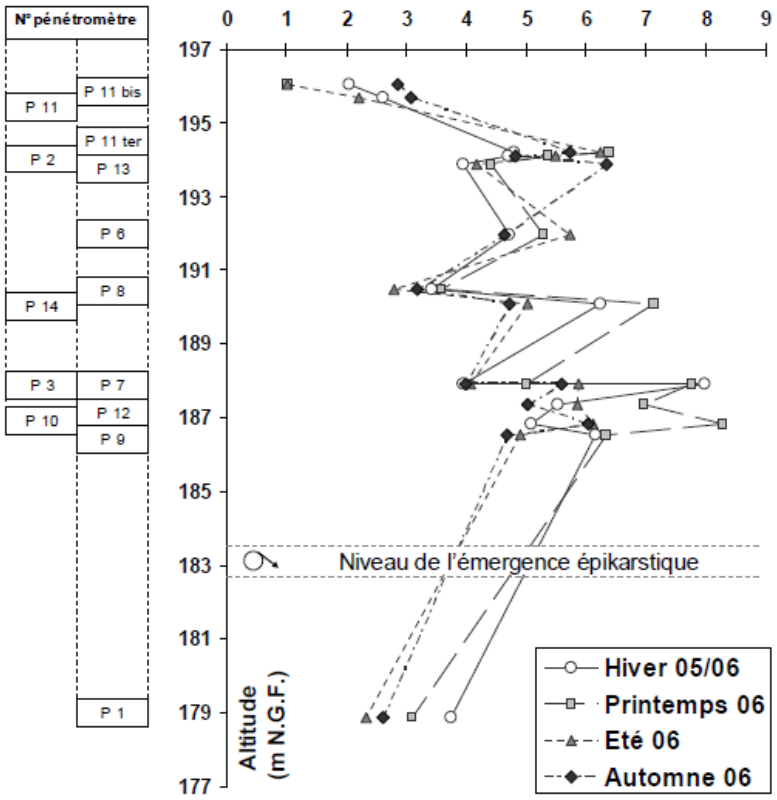


Figure III-4 : Mesures ponctuelles de PCO2 dans les formations de remplissage. La figure présente les moyennes saisonnières (en %vol) pour chacun des pénétromètres classés en fonction de l'altitude de la mesure (Lopez, 2009).

Les résultats de la Figure III-4 montrent que les teneurs en CO_2 dans les remplissages sont élevées avec une gamme de valeur allant de 3 à plus de 8 %. Ces valeurs apparaissent élevées au regard de la littérature (Atkinson, 1977 ; Crowther, 1983). Les teneurs les plus fortes sont rencontrées dans les niveaux de remplissages localisés au-dessus de la cote de l'émergence épikarstique. La carte d'interpolation construite à partir des PCO_2 mesurées ponctuellement aux divers points de mesure, est présentée en Figure III-5.

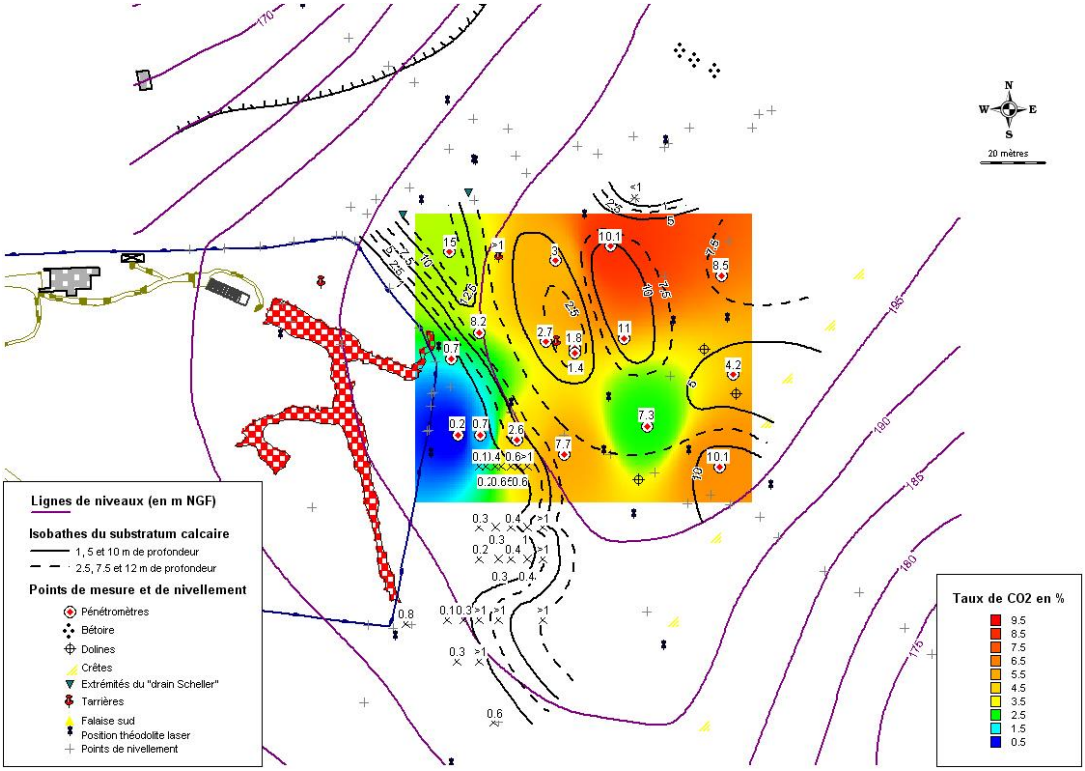


Figure III-5 : Carte d'interpolation des PCO_2 mesurées dans les différents pénétromètres et chambres de mesures situées dans les formations détritiques et à la surface des calcaires (Lopez, 2009). Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les mesures à l'origine de cette cartographie de la répartition spatiale des PCO_2, étaient réalisées à différentes profondeurs (notées sur la carte).

De plus, Lopez (2009) montre un fort décalage entre les teneurs dans le sol pédologique et dans les remplissages, à la fois en termes de gamme de variation avec un CO_2 pratiquement dix fois plus concentré dans les formations profondes par rapport au sol pédologique, et en termes d'évolution temporelle avec une production maximale dans le sol en été alors que les teneurs dans les remplissages sont maximales en hiver et au début du printemps.

Pour compléter l'analyse du comportement du CO_2, Lopez (2009) met en place une mesure en continu dans les altérites et dans les calcaires surmontés d'altérites (à 3 m de profondeur). Les résultats sont présentés en Figure III-6.

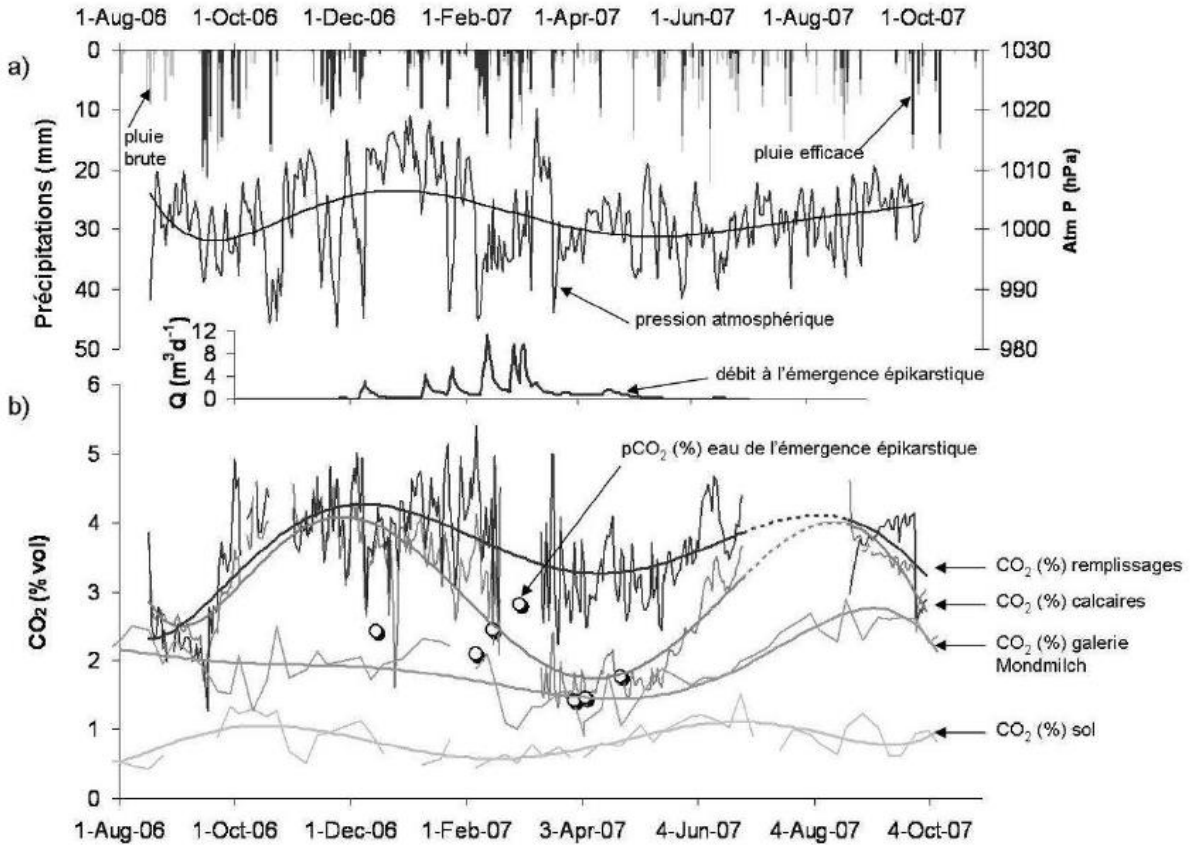


Figure III-6 : Mesure en continu sur le cycle 2006-2007 des teneurs en CO_2 et paramètres associés. a) pluie brute journalière et pluie efficace journalière (mm), pression atmosphérique (hPa) et débit journalier à l'émergence épikarstique (m3j-1). b) Chroniques des PCO_2 dans les formations de remplissages, dans les calcaires, dans la galerie Mondmilch, dans le sol au-dessus de la cavité et PCO_2eq dans les eaux de l'émergence épikarstique (Lopez, 2009).

Il constate alors que les écarts ne sont pas si importants que cela entre les deux types de formations, mais aussi que la variation saisonnière est bien réelle à cette profondeur (3 m). De plus, il semble montrer que la teneur en CO_2 varie lors des périodes d'écoulement, ce qui pourrait mettre en évidence un transport diphasique du CO_2 dans le sol (phase liquide et gazeuse). Ainsi, Lopez (2009) semble montrer un rôle important de l'eau dans la dynamique du CO_2 observée dans le massif karstique de la cavité de Lascaux.

III.1.3.2 Dernières avancées dans le domaine karstique

Contrairement aux agronomes qui s'intéressent depuis de nombreuses années à la production et aux flux de CO_2 émanant du sol, les hydrogéologues karstiques ne se sont que très peu focalisés sur la problématique de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose. Cependant, depuis le début du XXI^{ème} siècle, plusieurs études ont permis d'améliorer les connaissances d'une part sur la répartition spatio-temporelle du CO_2, et d'autre part sur les mécanismes impactant cette dernière.

Nous pouvons citer en premier lieu, l'étude de Benavente et al. (2010) qui relèvent des teneurs en CO_2 importantes à 30 mètres sous la surface (entre 3 et 6%) dans la zone vadose du karst de la grotte de la Nerja (Espagne), les attribuant à une production importante provenant de la biodégradation de la matière organique dissoute présente dans l'aquifère karstique sous-jacent. Il note aussi un impact important des variations de la pression atmosphérique sur les teneurs en CO_2 mesurées. Toujours en Espagne, Sanchez-Canete et al. (2011 et 2016) mettent en évidence l'impact important du vent sur les variations de teneurs en CO_2 dans les sols et les calcaires épikarstiques mis à nus. En effet, le vent chasserait le CO_2 présent dans les pores du sol ainsi que dans les fissures et fractures présentes dans les calcaires épikarstiques, expliquant ainsi l'augmentation des flux de CO_2 mesurés entre les sols et l'atmosphère. Ces observations viennent confirmer celle de Weisbrod et al., (2009) qui montre que les échanges entre la zone vadose et l'atmosphère se font de manière préférentielle à travers les fractures et fissures sous l'influence du transport advectif qu'il soit provoqué par des variations lentes de la pression atmosphérique ou brusquement par les rafales de vent mais aussi par les gradients thermiques.

Plus près de nous en France, une étude de la dynamique naturelle du CO_2 dans la zone vadose du karst a été conduite à travers le CO_2-Vadose-Project. Loisy et al. (2013) montrent que les concentrations les plus importantes (1 à 2 %) sont localisées dans les sols et les premiers mètres de la zone vadose et diminuent ensuite avec la profondeur. De nombreux paramètres impactant la dynamique du CO_2 sur ce site d'étude sont démontrés : la température, la pression atmosphérique ainsi que l'humidité du sol. Ces paramètres seront donc inclus dans notre dispositif de mesure.

III.2 Matériel et méthode : développement et instrumentation d'une parcelle expérimentale.

Comme nous l'avons vu précédemment, les connaissances actuelles relatives à la dynamique du CO_2 montrent la complexité des mécanismes de production et de ceux affectant les phénomènes de transfert du CO_2. La géologie et la pédologie complexe de la zone vadose du site de la grotte de Lascaux laissent elles aussi présager d'une diversité importante de facteurs et phénomènes responsables de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans cette dernière. De plus, la sensibilité du site d'étude vis-à-vis de la conservation de la grotte de Lascaux augmente aussi la difficulté de mise en œuvre d'une démarche scientifique reposant sur une répartition spatiale fine et complète du réseau de mesure à mettre en place.

Cependant, les moyens mis à notre disposition ainsi que les connaissances précises du site d'étude nous ont permis d'équiper une parcelle expérimentale à l'intérieur de laquelle

divers dispositifs de mesures en continu des teneurs en CO_2 et des paramètres hydroclimatiques *in-situ,* mais aussi ponctuelles (signal isotopique du CO_2) ont été implantés.

III.2.1 Localisation et instrumentation de la parcelle expérimentale

La parcelle expérimentale devait répondre au cahier des charges suivant :

- être représentative de ces formations géologiques rencontrées sur le site d'étude,
- être autant que faire ce peu représentative de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du site de la cavité de Lascaux,
- être située hors de l'enceinte et être proche de la cavité, dans une zone facile d'accès, sans pour autant causer de potentiels désordres à l'intérieur de cette dernière.
- être dans une zone dont l'alimentation en électricité et la connexion au réseau de mesure de la cavité sont possibles.

III.2.1.1 Détermination d'une zone de mesure adéquate

Pour déterminer la zone adéquate, nous nous sommes appuyés sur les mesures réalisées par les géophysiciens de l'Université de Bordeaux pour localiser une zone assez restreinte dans laquelle les calcaires et les formations détritiques sablo-argileuses sont affleurants. Les études menées par les pédologues (Université de Chambéry), les géomorphologues (H. Camus et L. Bruxelle) sont venues conforter ces conclusions. Les mesures des PCO_2 réalisées dans différents types de sols au cours de l'année précédant la thèse et poursuivies depuis, ont permis d'en préciser la localisation. Ces mesures effectuées grâce à un capteur NDIR (Non Dispersive InfraRed) de la marque Draegger et une canne à mesure de concentration de gaz dans les sols ont été suivies par la réalisation de cartes d'interpolation des PCO_2 des sols. Elles permettent de mieux localiser une zone restreinte mais à l'intérieur de laquelle les sols, formations géologiques et surtout les teneurs en CO_2 sont très différentes. Un exemple de carte d'interpolation obtenue par la méthode IDW (Inverse Distance Weight) présentée en Figure III-7, montre une différenciation importante des teneurs en CO_2 dans les sols selon leur type et donc la nature du substrat rocheux originel : PCO_2 plus faibles dans les brunisols pseudoluviques (sur les altérites) que dans les calcisols leptiques (sur le calcaire).

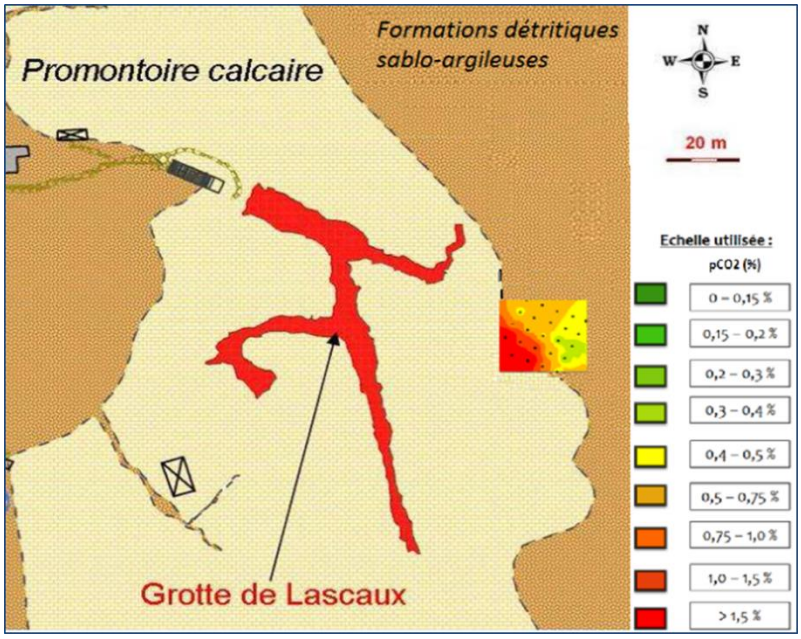


Figure III-7 : Carte d'interpolation (Inverse Distance Weight) des teneurs en CO_2 au 25/05/2013 dans les sols se développant sur les calcaires épikarstiques (calcisols leptiques) et les altérites est (brunisols pseudoluviques).

Les informations recueillies grâce à toutes ces études ont conduit à la sélection d'une zone d'environ 900 m^2 située à l'Est de l'enceinte de protection de la cavité. Cette dernière est située à une distance de 20 m de la cavité à cheval sur les altérites et la dalle calcaire. Nous sommes bien conscients que le principal type de sol présent au-dessus de la cavité n'est pas représenté dans cette zone, cependant, il s'avérait impossible de penser à mettre en place des forages aussi proche de la cavité de Lascaux, bien qu'ils ne soient que superficiels. Le choix de cet emplacement est aussi motivé par l'accès facilité à une alimentation électrique de 220 Volts et au réseau de mesure de la cavité. En effet, les anciennes armoires de mesure des PCO_2 mis en place au cours de la thèse de Lopez (2009) sont situées à proximité ce qui pourrait aussi permettre de comparer et possiblement de réinterpréter les mesures acquises entre Août 2006 à Octobre 2007 par ce dernier. La Figure III-8 présente la localisation précise de la parcelle expérimentale sur la carte géologique simplifiée du site de Lascaux (b) ainsi qu'une représentation sur la coupe géologique schématique (c) des différents forages mis en place dans les calcaires de l'épikarst et les altérites sablo-argileuses présentes dans les dépressions de la dalle calcaire coniacienne originelle.

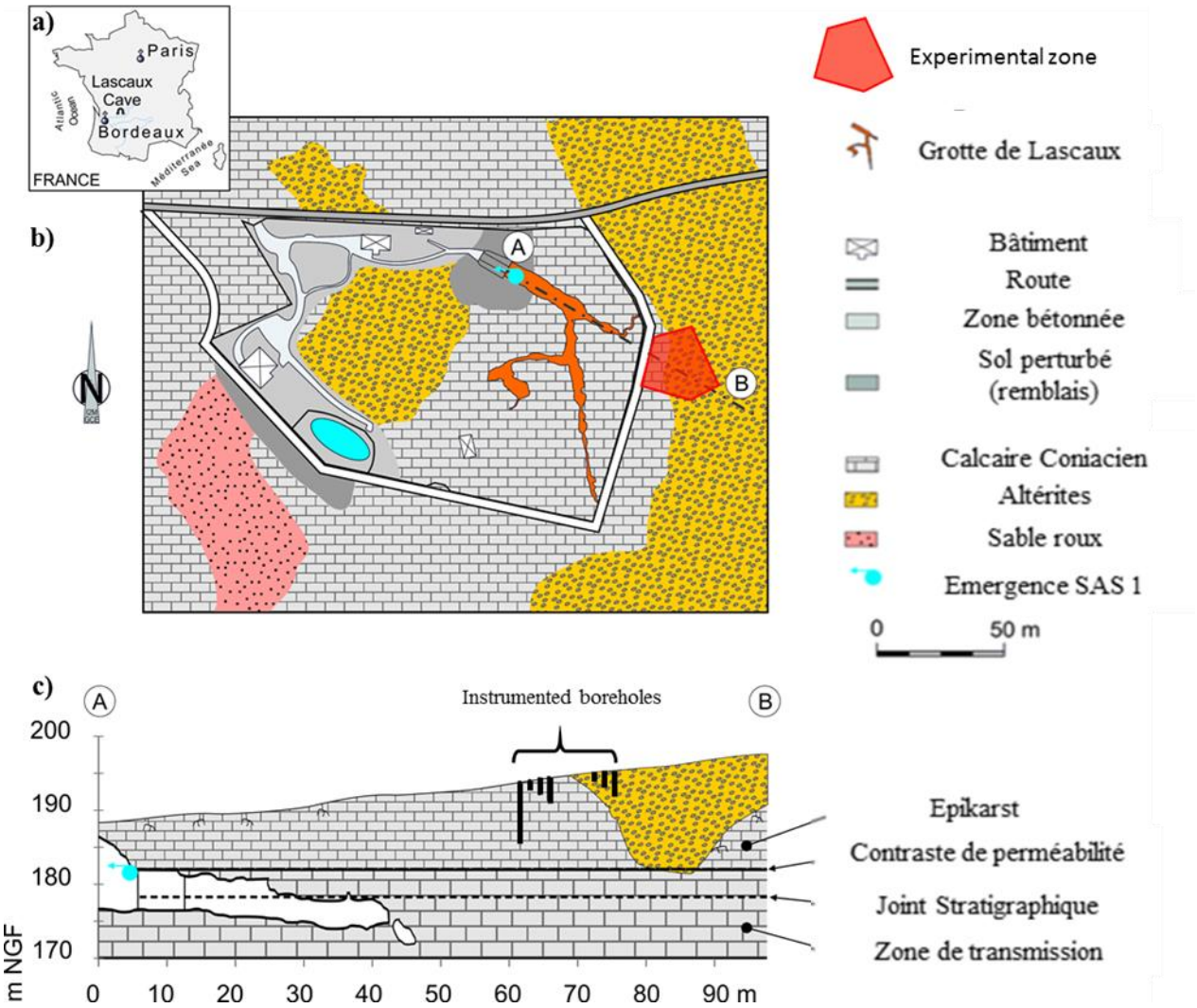


Figure III-8 : Localisation de la parcelle expérimentale à l'extérieur de l'enceinte de la grotte de Lascaux sur la carte géomorphologique simplifiée (b). Implantation des forages sur la coupe géologique schématique (c).

III.2.1.2 Implantation et description des différents forages

Au total, ce sont sept forages qui ont été réalisés sur le site de la parcelle expérimentale :

- 4 forages dans les calcaires de l'épikarst : FC1, FC2, FC3 et FC4 dont les profondeurs respectives sont de 1, 2, 3 et 7.70 m,
- 3 forages dans les altérites sablo-argileuses : FR1, FR2 et FR3 dont les profondeurs respectives sont de 1, 2 et 3 m.

L'implantation des forages a débuté à la fin du mois de Mai 2014 après avoir obtenu l'accord administratif du propriétaire du terrain, la société d'exploitation de Lascaux II (Semitour).

Les trois forages dans les formations détritiques ont été réalisés facilement grâce à une tarière à main de 100 mm de diamètre. Pour ce qui est des forages dans les calcaires, ils ont été

effectués par la société Alios. Il a été décidé de réaliser des sondages carottés de 100 mm de diamètre pour récupérer des échantillons sous forme de carotte. La technique de forage à air comprimé a été choisie et non à eau, pour éviter les infiltrations d'eau vers la profondeur et donc la cavité à travers les réseaux de joints et de fractures de l'épikarst. La Figure III-9 vient illustrer les opérations de carottage.

Figure III-9 : Photographie illustrant la mise en place par carottage à l'air comprimée du forage FC4.

Les difficultés rencontrées par l'entreprise mandatée pour réaliser les forages dans les calcaires ont conduit à la perte de nombreux échantillons de calcaire recueillis lors de la foration du forage FC4. Cependant, les logs géologiques présentés en **Annexe 3** ont pu être réalisés à partir des descriptions des échantillons récupérés.

Les forages réalisés dans les calcaires mettent en lumière les structures pédologiques et géologiques suivantes :

- Dans les calcaires : présence d'un horizon humifère (Tv) dans les dix premiers centimètres suivis des structures pédologiques caractéristiques des calcisols leptiques (S-Ca) sur 0.3 m d'épaisseur pour FC1, FC2 et FC3 et 0.65 m pour FC4. L'interface avec la roche mère constituée d'un horizon de calcaire altéré (Ca-Alt) avec présence d'argiles est épaisse de 0.1 à 0.25 m d'épaisseur. Les calcaires du coniacien supérieur très facturés et délités (Ca-DF) sont ensuite retrouvés jusqu'au fond des trois premiers forages et jusqu'à 6.0 m de profondeur. De 6 à 7 m de profondeur, les échantillons du forage FC4 semblent être constitués d'un calcaire plus altéré et donc plus riche en argile comme le laissait à penser les profils de tomographie de résistivité électrique réalisés

par Xu (2015) (Figure III-10). Enfin, des calcaires plus compacts constituent la fin de ce forage qui atteint 7.7 m de profondeur.

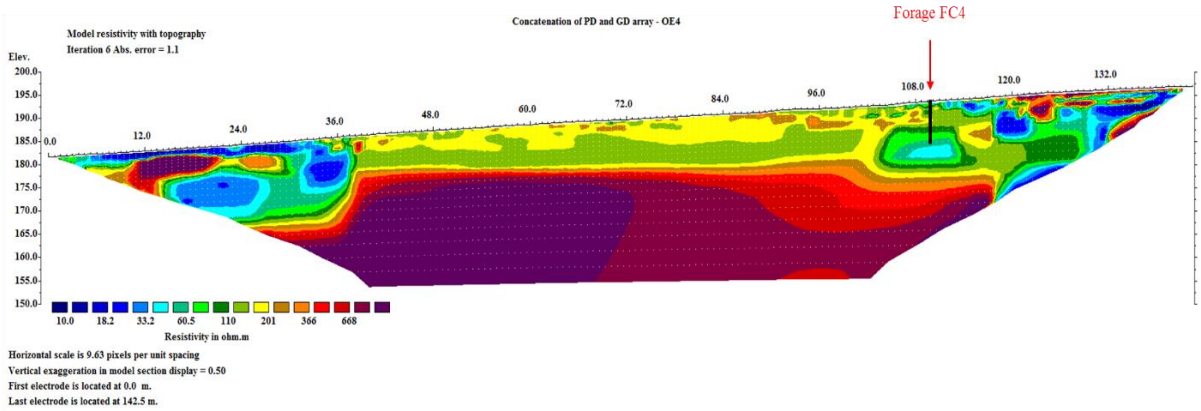


Figure III-10 : Profil de tomographie de résistivité électrique montrant la présence supposée de calcaire altéré plus argileux au niveau du forage FC4 (Xu, 2015).

- Dans les altérites (FR1 à FR3) : un brunisol pseudoluvique (Tv) peu développé (0.1 m d'épaisseur) est présent en surface. Des altérites constituées de sable ocre à rognons de silex (S-Si) sont rencontrés jusqu'à 0.8 m de profondeur. Un horizon plus argileux (Sa-Si) est ensuite observé sur 1.4 m de profondeur pour laisser ensuite place une lentille argileuse à cailloutis calcaires de 0.4 m d'épaisseur (As-Ca). Enfin une altérite similaire (Sa-Si) à la précédente est observée jusqu'à 3.0 m de profondeur dans le forage FR3.

Remarque : 12 autres tarières de faible diamètre ont été réalisées de 0.25 à 2.0 m de profondeur pour la mise en place de capteurs de teneur en eau et de tensiométrie. Les caractéristiques géologiques retrouvées sont semblables à celles de forages FR1, FR2 et FR3.

III.2.1.3 Instrumentation de la parcelle expérimentale :

Différents capteurs ont été implantés dans les forages, mais aussi directement dans les formations détritiques. Chacun des sept forages est donc équipé de trois capteurs différents :

- un capteur NDIR pour la mesure de la PCO_2 de l'air (GMP 221, Vaisala, précision : ±0.2 % de la mesure),
- un capteur chimique pour la mesure de la PO_2 de l'air (FY9600O2, Alhborn, précision : ±1%),
- un capteur pour la mesure de la pression absolue (ATM.ECO, STS, précision : ±0.1 hPa) pour suivre les variations de la pression atmosphérique dans le forage mais aussi la présence éventuelle d'une nappe temporaire.

Cependant, les capteurs de PCO_2 et PO_2 ne peuvent être immergés comme cela pourrait être le cas lors de la formation de nappes temporaires dans les calcaires et les formations détritiques. Il était donc obligatoire de trouver une solution technique pour protéger ces capteurs de l'eau tout en permettant les mesures. Pour cela, une membrane en polyuréthane de 50 µm d'épaisseur (American Polyfilm Incorporation) est utilisée pour confectionner une chambre de mesure imperméable à l'eau mais perméable aux gaz. Cette membrane spécifique a été au préalable testée en laboratoire en comparant les mesures effectuées par deux capteurs de PCO_2 différents placés en dehors et à l'intérieur de la chambre de mesure confectionnée avec la membrane. Une injection de gaz à une concentration de 5 % est ensuite réalisée à un instant t. Les résultats montrent une réactivité plus lente pour le capteur placée à l'intérieur de la membrane. Cependant, 35 minutes après l'injection, les PCO_2 sont équivalentes pour les deux capteurs. Ce délai de réactivité n'a pas été considéré comme rédhibitoire, ce dernier est inférieur aux fréquences de variations des teneurs en CO_2 mesurées dans les sols par Lopez (2009). Les tests d'immersion ont quant à eux donné entière satisfaction.

Les capteurs de PCO_2 ainsi que le capteur de PO_2 sont donc placés à l'intérieur de la membrane, alors que le capteur de pression absolue est placé dans une chambre périphérique. Pour cela, un système de tubage à double diamètre (100mm/40mm) a été pensé et usiné. Le schéma du dispositif de tubage est présenté en Figure III-11.

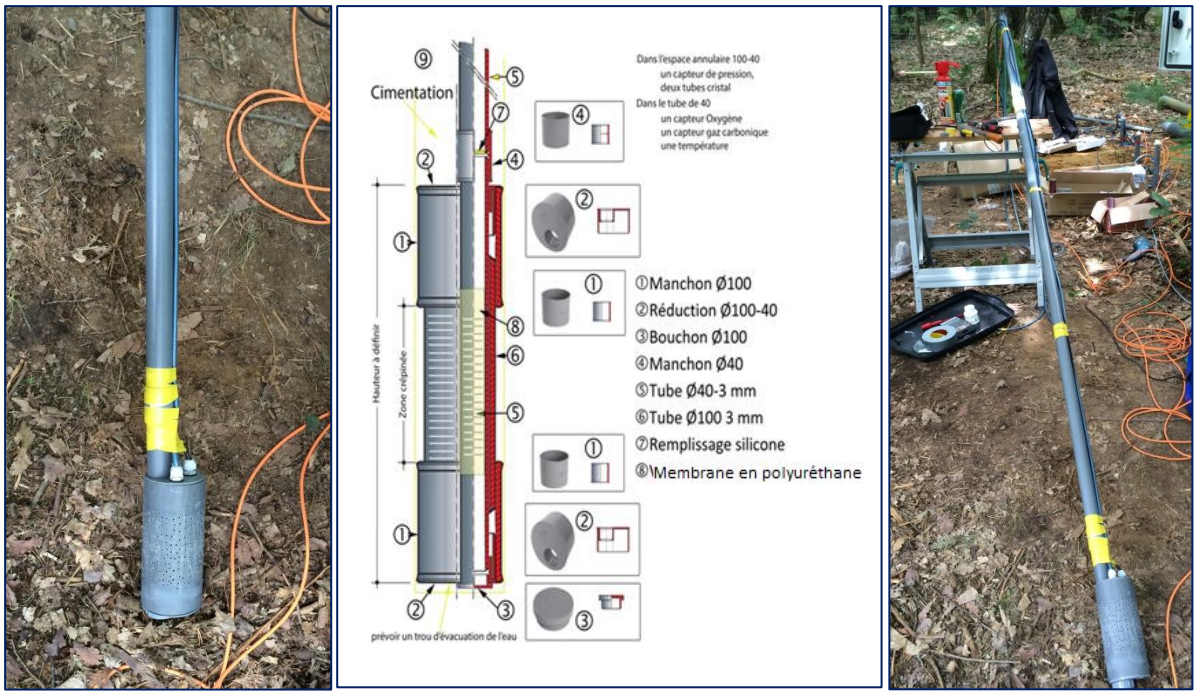


Figure III-11 : Photographies et schéma du dispositif de mesure développée pour protéger les capteurs de PCO2 et PO2. Le film jaune représente la membrane en polyuréthane.

Les tubes munis des capteurs ont été placés dans les forages. Une couche (0,30 m d'épaisseur) de sable fin est ensuite incorporée avant la cimentation dans le fond du forage pour

boucher l'espace annulaire restant entre la chambre de mesure et les parois et éviter la pénétration du ciment de scellement dans la chambre de mesure. Par ailleurs, les tubes en PVC contenant les capteurs sont bouchés par une mousse expansive pour éviter les échanges avec l'atmosphère.

En plus de ces mesures dans les forages, 6 capteurs de mesure de la teneur en eau volumique et de la température du sol (ML3 ThetaProbe, Delta T Devices Ltd) et 6 capteurs de mesure de la tension d'eau dans le sol (tensiomètres électroniques à capteur profond STCP 850, SDEC) ont été implantés dans les formations détritiques sablo-argileuses à 0.2, 0.5, 0.75, 1, 1.5 et 2 m de profondeur. Ces capteurs permettront de suivre les fronts d'infiltration ainsi que les températures à différentes profondeurs pour déterminer comment ces paramètres influencent les PCO_2 et PO_2 mesurées.

Tous ces capteurs sont ensuite reliés à deux dataloggers Ahlborn de 30 et 9 voies d'acquisition disposés dans une armoire électrique et connectés au réseau de mesure de Lascaux. Ces derniers permettent l'acquisition des données au pas de la minute. Le schéma de l'armoire de mesure est présenté en **Annexe 4**. L'implantation des différents forages et autres capteurs dictée par des contraintes techniques est schématisée en Figure III-12.

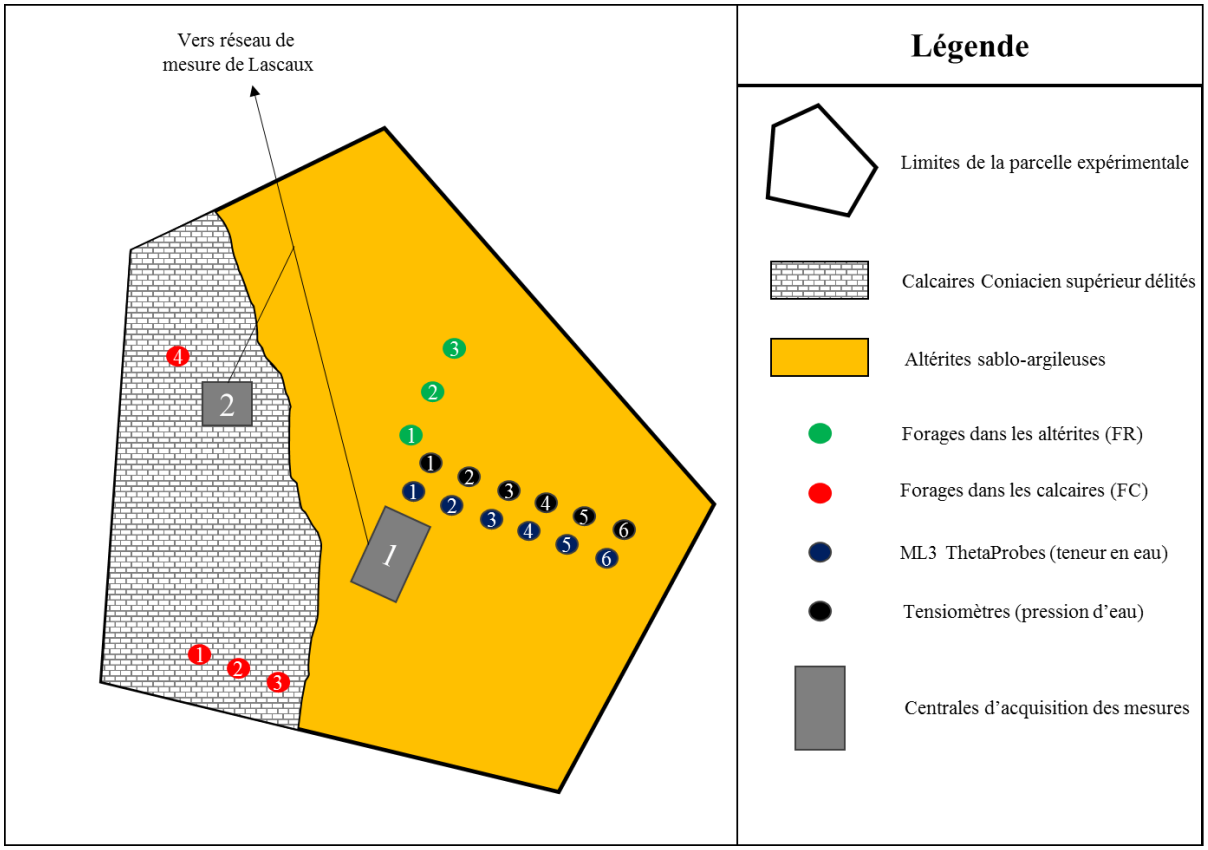


Figure III-12 : Représentation schématique de la parcelle expérimentale mise en place avec les différents forages, capteurs de mesures annexes et centrales d'acquisition des données. La limite stratigraphique entre calcaires et altérites est aussi représentée.

III.2.2 Développement d'un dispositif de mesure en continu du flux de CO_2 sortant du sol

En complément des mesures permettant d'apprécier la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 et O_2 dans les forages ainsi que les paramètres hydroclimatiques dans les altérites, il paraissait important de quantifier ou au moins de comprendre les échanges de CO_2 entre les sols et l'atmosphère.

Cependant, les différents dispositifs étant trop onéreux (plusieurs dizaines de milliers d'euros), l'idée a dans un premier temps été abandonnée. Finalement, il a été décidé de développer un système de mesure abordable qui devait permettre une mesure en continu suffisamment précise.

III.2.2.1 Principe et description de la mesure

Le principe d'une mesure de flux de gaz (F en $g.m^{-2}.j^{-1}$) consiste à déterminer la masse du composé étudié qui traverse une surface connue au cours d'une période fixée. Ainsi, outre les dispositifs permettant de mesurer les flux par le principe d'Eddy Covariance, la majorité des mesures sont réalisées à l'aide d'une chambre de mesure de volume connue implantée sur le sol, à l'intérieur de laquelle l'évolution de la PCO_2 au cours du temps est suivie. La teneur en CO_2 mesurée à l'aide d'un capteur NDIR permet alors de revenir à la masse de CO_2 dégazé par le sol dans la chambre de mesure.

Cependant, cette mesure du flux de gaz sortant du sol est complexe du fait de nombreuses contraintes liées au processus de transfert du CO_2. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, les transferts de gaz peuvent se produire sous l'effet d'un gradient de concentration qui provoque alors un transport diffusif du composé gazeux de la masse d'air la plus riche (dans notre cas le sol), vers la masse d'air la plus pauvre en CO_2 (ici l'atmosphère). S'ajoute à ce mécanisme, le transfert advectif sous l'effet d'un gradient de pression, d'un front d'infiltration ou encore d'un gradient de température. Dès lors, les conditions de température, de CO_2, d'humidité ainsi que de pression de l'air atmosphérique ainsi que de l'air du sol, vont jouer un rôle prépondérant dans ce phénomène. Ces conditions doivent donc être préservées autant que faire se peut, au cours des mesures. C'est pourquoi le dispositif de mesures développé devait remplir le cahier des charges suivant :

- Etre moins onéreux que les dispositifs commerciaux,

- Etre portatif et évolutif (doit permettre l'ajout de plusieurs points de mesure en parallèle),
- Permettre un suivi en continu de l'évolution de la PCO_2, température et pression atmosphérique,
- Perturber le moins possible les conditions de l'air atmosphérique et du sol.

Pour répondre à ces objectifs, le dispositif choisi comporte une cloche en verre à l'intérieur de laquelle des capteurs de PCO_2 (GMP 221) de température (PT100) et de pression atmosphérique différentielle sont installés de manière hermétique. Ces capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition de la marque Alhborn située dans une boîte de mesure portative, permettant l'enregistrement des mesures toutes les minutes. A cela s'ajoute une pompe antiretour qui permet de renouveler l'air à intervalle de temps régulier sous la commande d'un programmateur (Millénium) et de reproduire le plus fidèlement possible les conditions de température, de CO_2, d'humidité et de pression de l'air atmosphérique.

La mesure va alors se dérouler en trois étapes successives et automatisées :

- (1) L'air présent à l'intérieur de la cloche est purgée pour être certains d'avoir un air atmosphérique au début du cycle de mesure,
- (2) Le circuit est ensuite fermé pendant un intervalle de temps fixé, et le CO_2 va pendant ce temps dégazer du sol et faire augmenter la PCO_2 dans la cloche de mesure,
- (3) L'air de la cloche est renouvelé par la pompe pour permettre un nouveau cycle de mesure.

Deux photographies en Figure III-13 montrent le dispositif de mesure implanté à proximité du forage FC1 sur les calcisols leptiques.

Figure III-13 : Photographies à gauche du boitier de mesure composé d'une centrale d'acquisition, d'un programmateur et d'une pompe antiretour, à droite du dispositif de mesure complet implanté sur les calcisols leptiques de la parcelle expérimentale.

Le principe de la mesure est quant à lui résumé dans la Figure III-14.

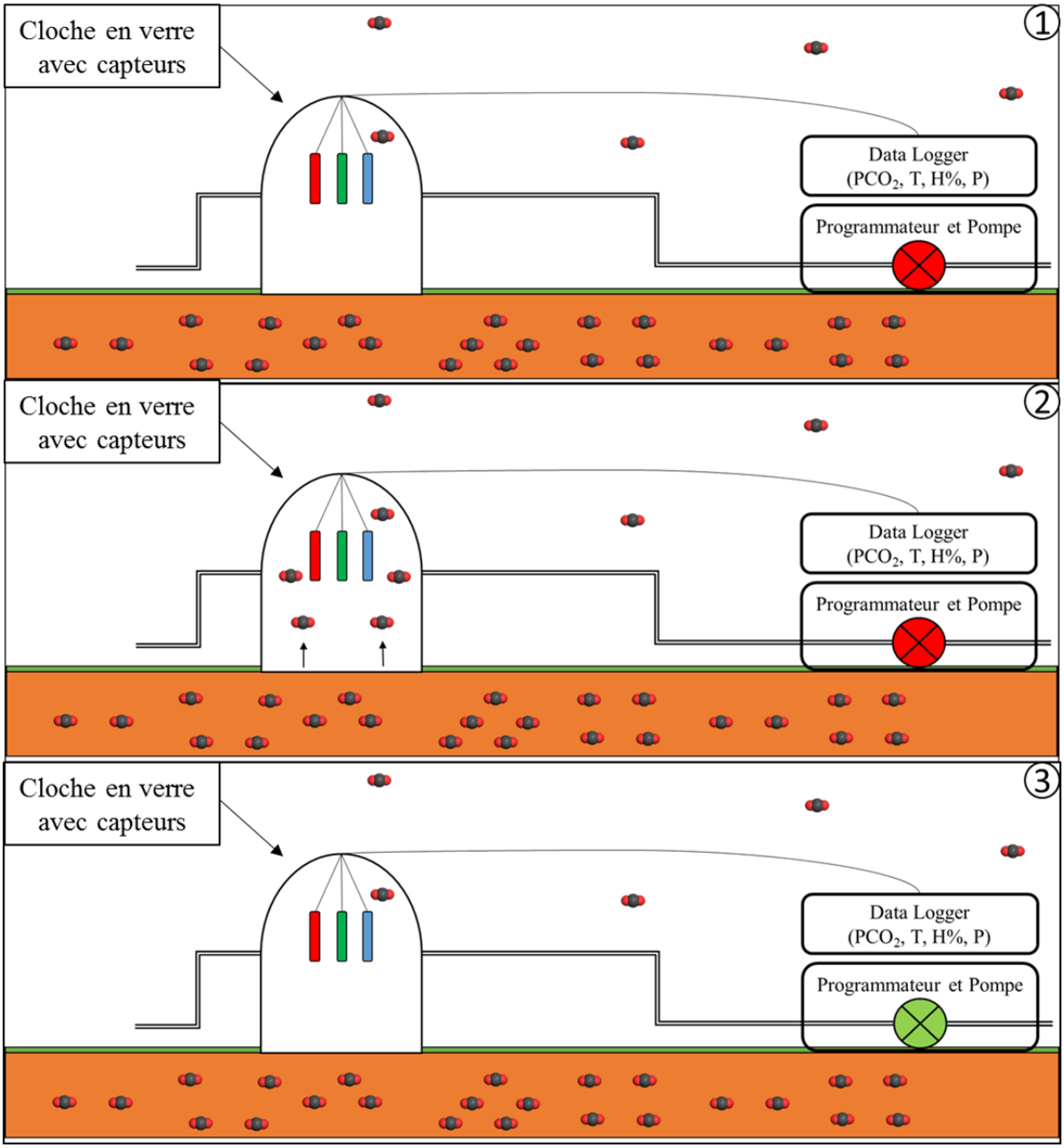


Figure III-14 : Représentation schématique du dispositif de mesure de flux de CO2 provenant du sol. Les différentes étapes de mesure décrite dans le manuscrit sont représentées (1, 2, 3).

III.2.2.2 Démarche de traitement des données brutes

Comme toutes les données de PCO_2 dans cette thèse, ces dernières sont dans un premier temps corrigées. En effet, les mesures de CO_2 par les capteurs NDIR réalisées dans des conditions de température et de pression différentes des conditions de calibration doivent être corrigées. La compensation requise dans ce cas est basée sur la loi des gaz parfaits et est effectuée à partir de l'équation 12 :

$$PCO2_{\text{corrigée}} = PCO2_{\text{mesurée}} * \left(\frac{1013*(T+273)}{289*P}\right) \quad (12)$$

Avec T la température en °C et P la pression atmosphérique en hPa.

Connaissant la teneur en CO_2 corrigée, il est alors possible de déterminer la masse de CO_2 contenue dans la chambre de mesure à un instant t avec l'équation 13 :

$$m_{CO2t} = PCO2_{\text{corrigée}} * m_w = PCO2_{\text{corrigée}} * (V_{\text{cloche}} * \rho_w) \quad (13)$$

Avec, m_w la masse d'air humide contenue dans la cloche (g), V_{cloche} le volume connue de la cloche (L) et ρ_w la masse volumique de l'air humide présente dans la cloche ($g.L^{-1}$) déterminée à partir des équations 14 et 15 tirées de Garcia-Anton et al., (2014) :

$$\rho_w = \frac{M_{a\prime}*(P-p_w)+ M_w* p_w}{R*T} \quad (14)$$

$$\rho_w = \frac{M_{a\prime}*(P-p_w- p_{CO2})+ M_w* p_w+M_{CO2}* p_{CO2}}{R*T} \quad (15)$$

Avec M_a, M_w, $M_{a'}$ et M_{CO2} respectivement les masses moléculaires de l'air sec (28.97 $g.mol^{-1}$), de la vapeur d'eau (18.02 $g.mol^{-1}$), de l'air sec sans le CO_2 (28.95 $g.mol^{-1}$) et du CO_2 (44.01 $g.mol^{-1}$) selon (CRC, 2003). P est la pression totale (atm) et p_w et p_{CO2} font références respectivement à la pression partielle de la vapeur d'eau et du CO_2. R est la constante universelle des gaz parfaits ($L.atm.mol^{-1}.K^{-1}$) et T la température de l'air (°K). pw selon Lismondes (2002) est obtenu à l'aide des équations 16 :

$$p_w = \frac{P*\frac{m_w}{m_a}}{0.622+\frac{m_w}{m_a}} \quad (16)$$

Avec m_w et m_a la masse de vapeur d'eau et ma la masse d'air sec (g).

Le flux de CO_2 (F_{CO2} en $g.m^{-2}.j^{-1}$) est ensuite déterminé à partir de la variation de la masse de CO_2 dans la cloche de mesure entre l'état initial (air atmosphérique dans la cloche) et un instant t (air chargé en CO_2 dans la cloche). L'équation 17 résume le calcul de F_{CO2} :

$$F_{CO2} = S * \frac{dm_{CO2}}{dt} \quad (17)$$

Avec S la surface au sol de la cloche de mesure (m^2), d_{mCO2} la variation de la masse de CO_2 dans la cloche (g) et dt l'intervalle de temps entre l'état initial et final (j).

La surface de la cloche de mesure étant connue, il reste à fixer deux paramètres différents que sont le temps entre deux cycles de pompage et le temps entre l'état initial et l'état final. Pour le premier d'entre eux, il a été fixé à 30 minutes pour permettre une résolution temporelle suffisante sans toutefois perturber les conditions dans le sol par des pompages trop rapprochés.

Pour le deuxième paramètre, de nombreux tests ont été effectués et ont permis de choisir un temps d'intégration de 5 minutes. Ce dernier permet de s'affranchir du progressif équilibre qui s'instaure par diffusion entre l'air de la cloche et l'air du sol, mais d'être tout de même représentatif du flux réel.

III.2.3 Suivis ponctuels annexes

Parallèlement, deux suivis ponctuels ont été effectués au cours de ces travaux de thèse mais aussi au cours d'un stage de recherche réalisés au préalable pour préparer cette étude. Ces suivis sont les suivants :

- La mesure des teneurs en CO_2 dans les rendosols, calcisols et brunisols pseudoluviques,
- L'analyse du signal isotopique du $\delta^{13}C_{CO2}$ présent dans l'air des différents forages implantés dans la parcelle expérimentale.

III.2.3.1 Les teneurs en CO_2 dans les sols de la parcelle expérimentale

Ce suivi a été réalisé au pas mensuel dans la zone dans laquelle la parcelle expérimentale a ensuite été implantée, mais aussi au-dessus de la cavité au cours de deux campagnes de mesure. Les points de mesure sont répartis en deux maillages différents (Figure III-15).

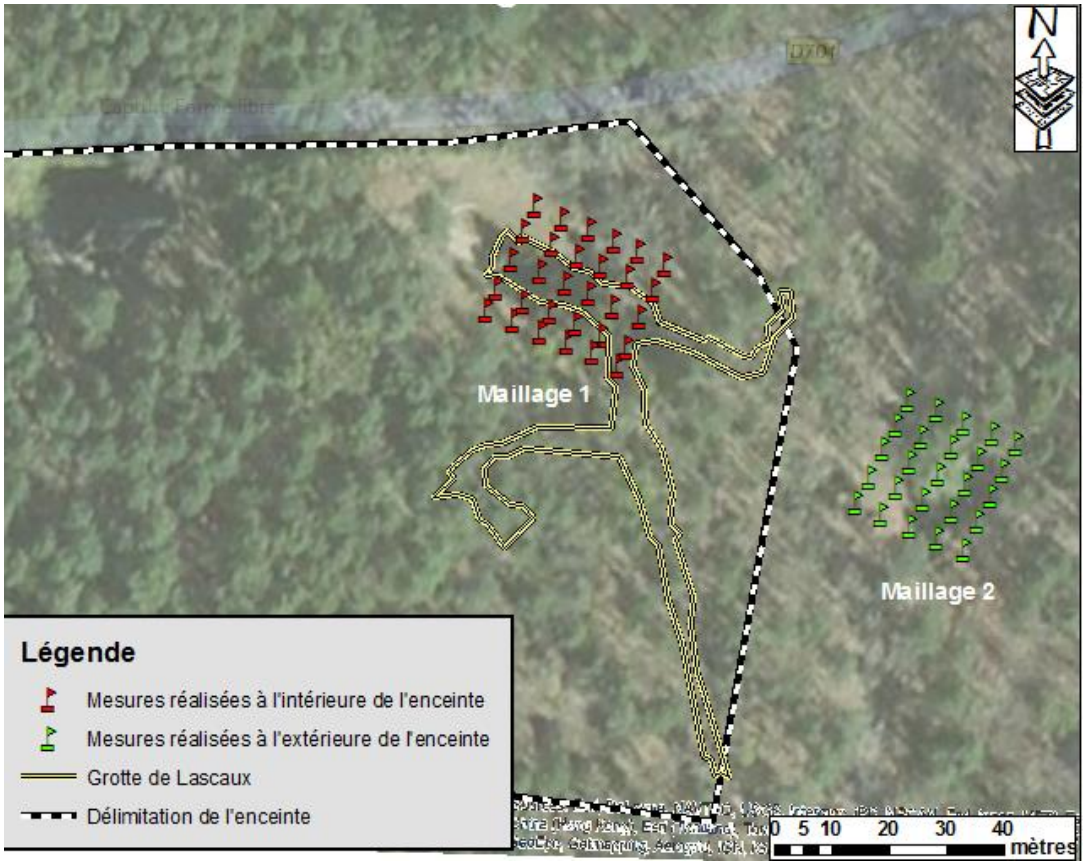


Figure III-15 : Localisation des points de mesure de la PCO2 dans les différents sols présents sur le site d'étude.

Le suivi consiste en la mesure de la PCO_2 de l'air présent dans la porosité des différents sols présents dans la zone à l'aide d'un capteur NDIR portatif (Draegger) et d'une canne à gaz permettant de pomper cet air à la profondeur voulue (0.35 m dans notre cas). Des cartes d'interpolation IDW (Inverse Distance Weight) sont ensuite construites pour chaque campagne de mesure. Elles permettront de comprendre la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans les sols au-dessus de la cavité de Lascaux.

III.2.3.2 Les prélèvements pour l'étude du signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 dans l'épikarst

Ces prélèvements ponctuels ont été effectués au cours de trois campagnes différentes dans les 7 forages à notre disposition à l'aide d'ampoules de verres de 500 ml à deux sorties fermées hermétiquement par de la graisse à vide. L'air est pompé par le capteur NDIR (Draegger), ce qui permet dans le même temps de s'assurer que l'air prélevé a la même PCO_2 que celle mesurée dans les forages par les capteurs *in-situ*.

Les échantillons sont ensuite envoyés au LAB/ISO (BRGM) et analysés avec un chromatographe gazeux couplé à un spectromètre de masse (Gas Bench avec Delta +XP, reproductibilité de la mesure : 0.03‰).

III.3 La dynamique du CO_2 dans l'épikarst de Lascaux et les formations détritiques sablo-argileuses associées

Cette partie a pour objectifs de présenter les principaux phénomènes impactant la dynamique du CO_2 dans la partie superficielle de la zone vadose de la colline de Lascaux, à partir des données recueillies dans la parcelle expérimentale. Pour cela, un panorama des données à notre disposition est préalablement réalisé. Les principaux phénomènes bio-physico-chimiques responsables de la dynamique tels que la production, l'accumulation et les transferts de CO_2 sont ensuite discutés, permettant de conclure par la construction d'un modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose de la cavité de Lascaux.

III.3.1 Données disponibles :

Cette sous partie a pour objectif de présenter les données acquises au cours des travaux de thèse. Seront ainsi abordées les points suivants :

- Les flux de CO_2 des calcisols leptiques (III.3.1.1),
- Les PCO_2 mesurées dans les calcisols et brunisols de la parcelle expérimentale (III.3.1.2),
- Les PCO_2 obtenus grâce au suivi en continu des forages dans la parcelle expérimentale (III.3.1.3),
- Les paramètres hydroclimatiques enregistrés dans la parcelle expérimentale (températures, teneurs en eau volumiques, pression atmosphérique) (III.3.1.4),
- Les analyses isotopiques du CO_2 prélevé dans les différents forages de la parcelle expérimentale et les sols au-dessus de la cavité de Lascaux (III.3.1.5).

III.3.1.1 Les flux de CO_2 ascendants sol/atmosphère

Les mesures de flux de CO_2 ont été mises en place le 18/05/2016 sur les calcisols de la parcelle expérimentale (3 mois de données sont disponibles). Ces dernières ne permettront pas d'effectuer des corrélations directes avec les variations temporelles de PCO_2 observées dans l'épikarst, les altérites et les sols de la parcelle expérimentale. Cependant, elles apporteront des éléments de compréhension des phénomènes physiques affectant les échanges de CO_2 entre le massif et l'atmosphère. L'évolution du flux de CO_2 (F_{CO2}) au cours de la période d'acquisition de données est visible en Figure III-16. Les statistiques descriptives sont aussi présentées.

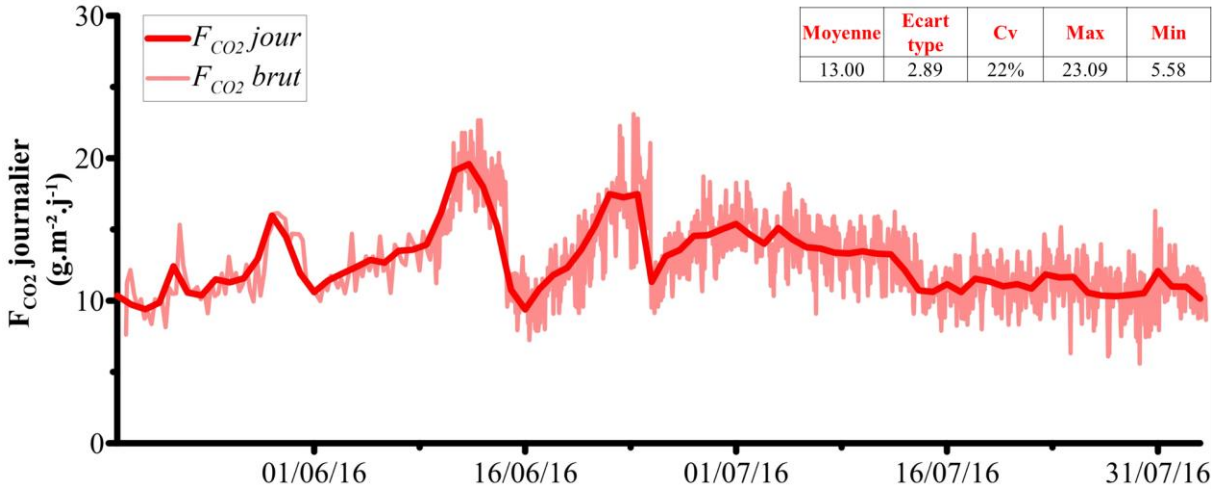


Figure III-16 : Evolution des flux de CO_2 émanant des calcisols leptiques dans la parcelle expérimentale. Les données brutes, les moyennes journalières et les principales statistiques du flux mesuré sont présentées.

La variabilité est importante au cours des trois mois d'enregistrement. Cette dernière est d'autant plus importante que les mesures sont rapprochées dans le temps. C'est pourquoi, cette variabilité journalière est supérieure après le 09/06/2016. En effet, le nombre de mesure par jour passe de 4 à 48, après une phase d'étalonnage du temps de chaque cycle de mesure durant les 20 premiers jours.

Le flux de CO_2 émanant des calcisols leptiques est alors en moyenne de 13 g.m^{-2}.j^{-1} avec un coefficient de variation de 22 %. Deux augmentations suivies de diminutions sont observées successivement au cours du mois de Juin 2016 avec une valeur maximale de 24 g.m^{-2}.j^{-1}, environ deux fois supérieure à la moyenne. Le flux varie peu ensuite jusqu'à la fin de l'enregistrement le 03/08/2016. Les paramètres hydroclimatiques de l'atmosphère (température, pression atmosphérique, pluviométrie) mais aussi des altérites (température et teneurs en eau volumiques) responsables de ces variations seront discutés ultérieurement. Ils pourront apporter des éléments de compréhension de la dynamique du CO_2 dans les sols mais aussi dans les forages plus profonds.

III.3.1.2 Les PCO_2 mesurées dans les sols :

Les mesures des teneurs en CO_2 dans les sols (profondeur : 0.35 m) de la parcelle expérimentale ont consisté en 16 campagnes réparties de Mars 2013 à Juin 2014. Ces dernières n'ont pas été poursuivies ultérieurement du fait de la mise en place des différents forages dans la zone de mesure qui rendait impossible l'implantation du dispositif de mesure du fait de la présence de nombreux câbles d'alimentation et de transfert des données sur le site. Cependant, cette année de mesure a permis comme évoqué précédemment, de mettre en lumières les

différences de répartition spatio-temporelle du CO_2 selon les périodes de l'année et surtout les différents types de sols.

Le Tableau III-3 présente les statistiques descriptives des 16 campagnes de mesures réalisées au cours de la première année d'étude, en séparant les valeurs mesurées dans les calcisols leptiques et les brunisols pseudoluviques.

Tableau III-3 : Mesures de PCO_2 dans les calcisols leptiques et brunisols pseudoluviques effectuées au cours des différentes campagnes. Les moyennes, écarts types, coefficients de variation, minimums et maximums sont aussi présentés.

date	Calcisols Leptiques					Brunisols Pseudoluviques				
	Moyenne PCO2 (%)	Ecart type PCO2 (%)	Coefficient de variation	Max PCO2 (%)	Min PCO2 (%)	Moyenne PCO2 (%)	Ecart type PCO2 (%)	Coefficient de variation	Max PCO2 (%)	Min PCO2 (%)
21/03/2013	0.27	0.14	50%	0.55	0.11	0.21	0.07	36%	0.37	0.10
27/03/2013	0.36	0.30	82%	0.86	0.11	0.17	0.04	20%	0.25	0.11
09/04/2013	0.80	0.75	94%	1.96	0.15	0.33	0.25	77%	1.14	0.12
10/04/2013	0.86	0.58	68%	1.78	0.2	0.22	0.05	21%	0.32	0.14
24/04/2013	0.84	0.56	67%	1.48	0.16	0.33	0.11	34%	0.66	0.16
25/04/2013	0.66	0.37	56%	1.34	0.27	0.30	0.08	27%	0.54	0.20
22/05/2013	1.86	0.70	38%	2.85	0.94	0.52	0.18	35%	1.10	0.28
02/06/2013	1.26	0.66	53%	2.25	0.51	0.51	0.35	68%	1.86	0.22
09/10/2013	1.21	0.49	41%	2.25	0.78	0.57	0.13	23%	0.83	0.39
13/11/2013	1.10	0.60	55%	2.10	0.44	0.33	0.08	25%	0.56	0.26
15/01/2014	0.77	0.44	57%	1.38	0.27	0.32	0.07	23%	0.49	0.12
26/02/2014	0.68	0.44	65%	1.58	0.2	0.41	0.25	60%	1.24	0.16
08/04/2014	1.52	0.50	77%	3.35	0.3	0.49	0.18	38%	0.98	0.29
30/04/2014	1.62	0.60	72%	3.45	0.4	0.59	0.18	31%	1.08	0.39
21/05/2014	1.67	0.56	70%	3.50	0.45	0.64	0.18	29%	1.13	0.44
05/06/2014	1.73	0.51	67%	3.56	0.51	0.70	0.18	26%	1.19	0.50
16 campagnes	1.18	0.53	57%	3.56	0.11	0.41	0.15	37%	1.86	0.1

La Figure III-17 présente les moyennes des teneurs en CO_2 selon le type de sol relevées lors des 16 campagnes de mesure. Les principales statistiques descriptives sont aussi présentées.

Type de Sol	Moyenne	Ecart type	Cv (%)
Calcisols leptiques	1.18	0.67	57%
Brunisols pseudoluviques	0.41	0.15	37%

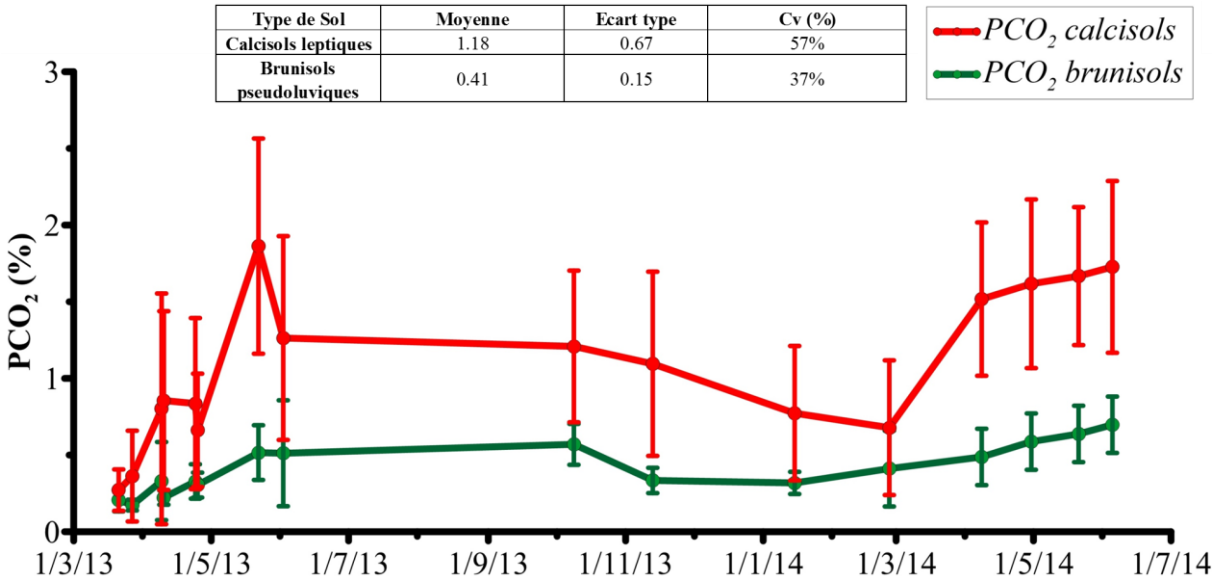


Figure III-17 : Evolution des teneurs en CO2 moyennes dans les calcisols (rouge) et les brunisols pseudoluviques (vert).

Une différence importante est observée selon les types de sols considérés. En effet, les valeurs moyennes montrent clairement une teneur en CO_2 supérieure dans les calcisols (1.18 %) par rapport aux luvisols (0.41%) tout au long de l'année. Les écarts types et coefficients de variation bien plus importants montrent toutefois des disparités selon les points de mesure dans les calcisols. Les variations saisonnières sont aussi plus conséquentes dans les sols se développant sur les calcaires. Cependant, une tendance commune est observée avec une augmentation au printemps et une baisse au cours des mois d'automne jusqu'à la fin de l'hiver. Les hypothèses quant à ces fluctuations ainsi qu'à la répartition des taux de CO_2 selon ces deux types de sols seront énoncées ultérieurement en se basant sur l'influence des paramètres hydroclimatiques sur la production de CO_2 en elle-même mais aussi sur les échanges entre atmosphère et sols (flux de CO_2).

III.3.1.3 Les PCO_2 enregistrées dans les forages de la parcelle expérimentale

Suite à l'implantation du dispositif de mesure dans les forages de la parcelle expérimentale à partir du 07/07/2014, deux années complètes de données ont pu être acquises. Notons tout de même que l'instrumentation du forage FC4 (7.7 m de profondeur) n'a été mise en place qu'au cours du mois de Février 2015, réduisant de 8 mois la période d'acquisition par rapport aux autres forages de la parcelle expérimentale. Parallèlement, le capteur de PCO_2 du

forage FC1 a subi un court-circuit provoqué par une arrivée d'eau dans la chambre de mesure. L'enregistrement de la PCO_2 en ce point de mesure n'a donc pas été possible de Janvier à Mars 2015 (date du changement de la sonde). De plus, les capteurs des forages FR2 et FR3 ont subi une intrusion d'eau dans la chambre de mesure au cours de l'hiver 2015. Ces sondes n'ont pu être remplacées du fait de la profondeur du forage qui n'a pas permis leur récupération.

La Figure III-18 présente les données complètes enregistrées au cours de ces deux années dans les 7 forages de la parcelle expérimentale. Pour rappel, les profondeurs des forages FR1, FR2, FR3, sont respectivement de 1, 2 et 3 m quand celles de FC1, FC2, FC3 et FC4 sont de 1, 2, 3 et 8 m.

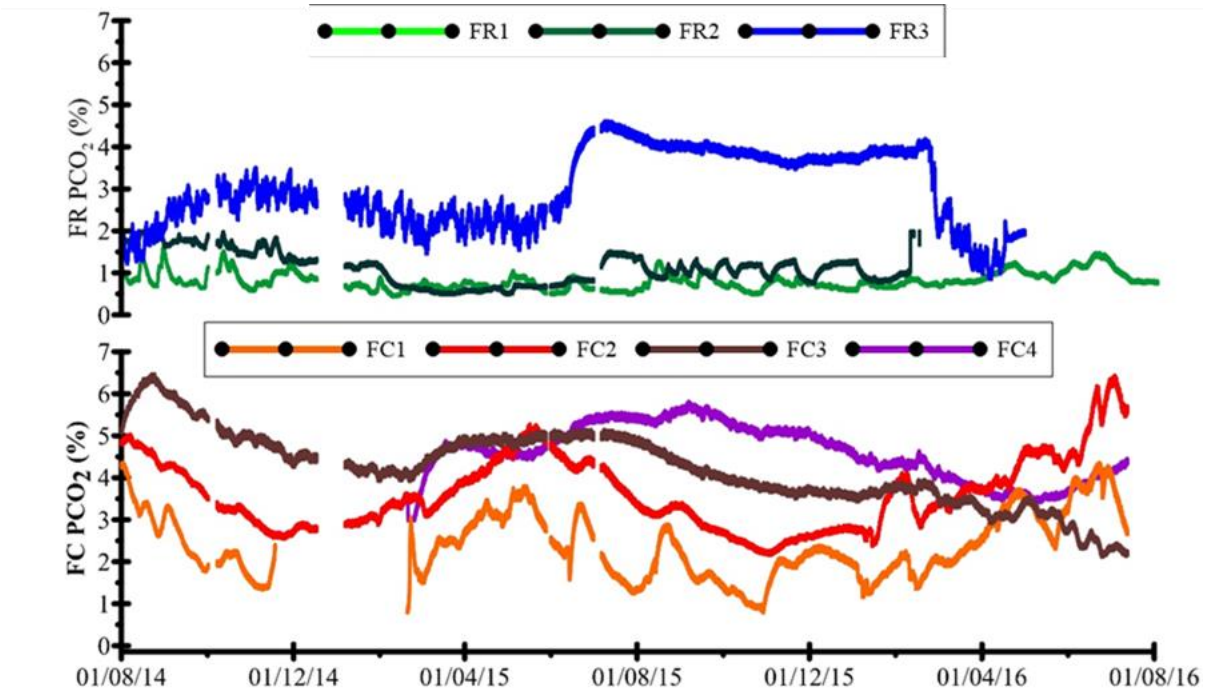


Figure III-18 : Séries temporelles complètes de PCO2 enregistrées dans les différents forages de la parcelle expérimentale implantés dans les altérites (1) et dans les calcaires épikarstiques (2).

La description précise de la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 n'étant ni aisée avec les données brutes, ni l'objectif de ce paragraphe, il est choisi de s'intéresser dans un premier temps aux statistiques descriptives générales puis aux variations des moyennes mensuelles dans ces différents forages.

Pour cela, le Tableau III-4 décrit statistiquement les séries temporelles complètes des PCO_2 acquises dans les forages de la parcelle.

Tableau III-4 : Statistiques descriptives pour les PCO_2 mesurées toute au long de l'étude dans les forages de la parcelle expérimentale.

	FR1	FR2	FR3	FC1	FC2	FC3	FC4
Moyenne *(%)*	0.83	1.15	2.97	2.35	3.67	4.21	4.55
Ecart type *(%)*	0.17	0.40	0.85	0.70	0.85	0.93	0.69
Coefficient de variation *(%)*	21%	35%	29%	30%	23%	22%	15%

La Figure III-19 présente quant à elle ces moyennes et écarts types sous-forme d'histogrammes.

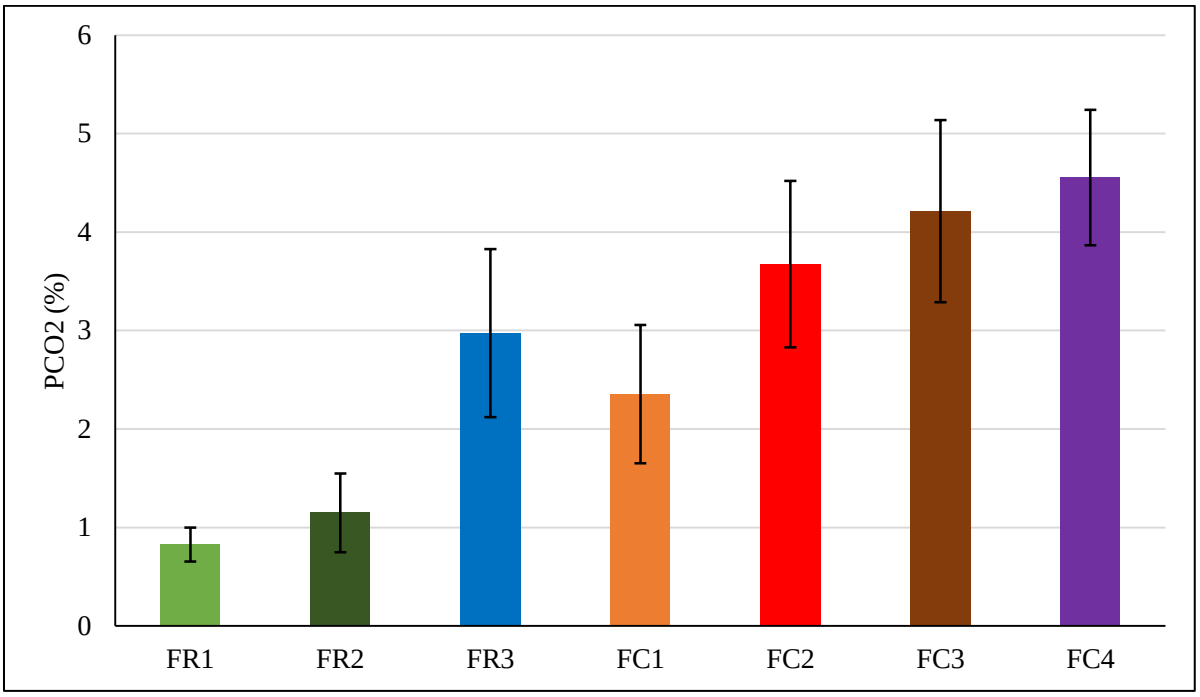


Figure III-19 : Moyennes des PCO_2 mesurées dans les différents forages de la parcelle expérimentale du 01/08/2014 au 01/08/2016

Plusieurs tendances ressortent avec en premier lieu des teneurs en CO_2 qui augmentent avec la profondeur, mais aussi une répartition des PCO_2 différentes selon l'encaissant. En effet, les teneurs en CO_2 sont bien plus importantes dans les calcaires que dans les altérites pour des mêmes profondeurs. La variabilité des teneurs en CO_2 est elle aussi différente selon la profondeur de mesure et la formation encaissante. En effet, le coefficient de variation diminue avec la profondeur dans les calcaires ce qui tend à montrer un impact important des processus affectant le CO_2 dans les deux premiers mètres. A contrario, dans les altérites, le coefficient de

variation est supérieur en profondeur avec des valeurs importantes pour FR2 (35 %) et FR3 (29 %). Cette observation ne peut être expliquée à ce stade.

L'évolution des moyennes mensuelles des teneurs en CO_2 au cours des travaux de thèse présentées en Figure III-20, vient appuyer ces premières constatations.

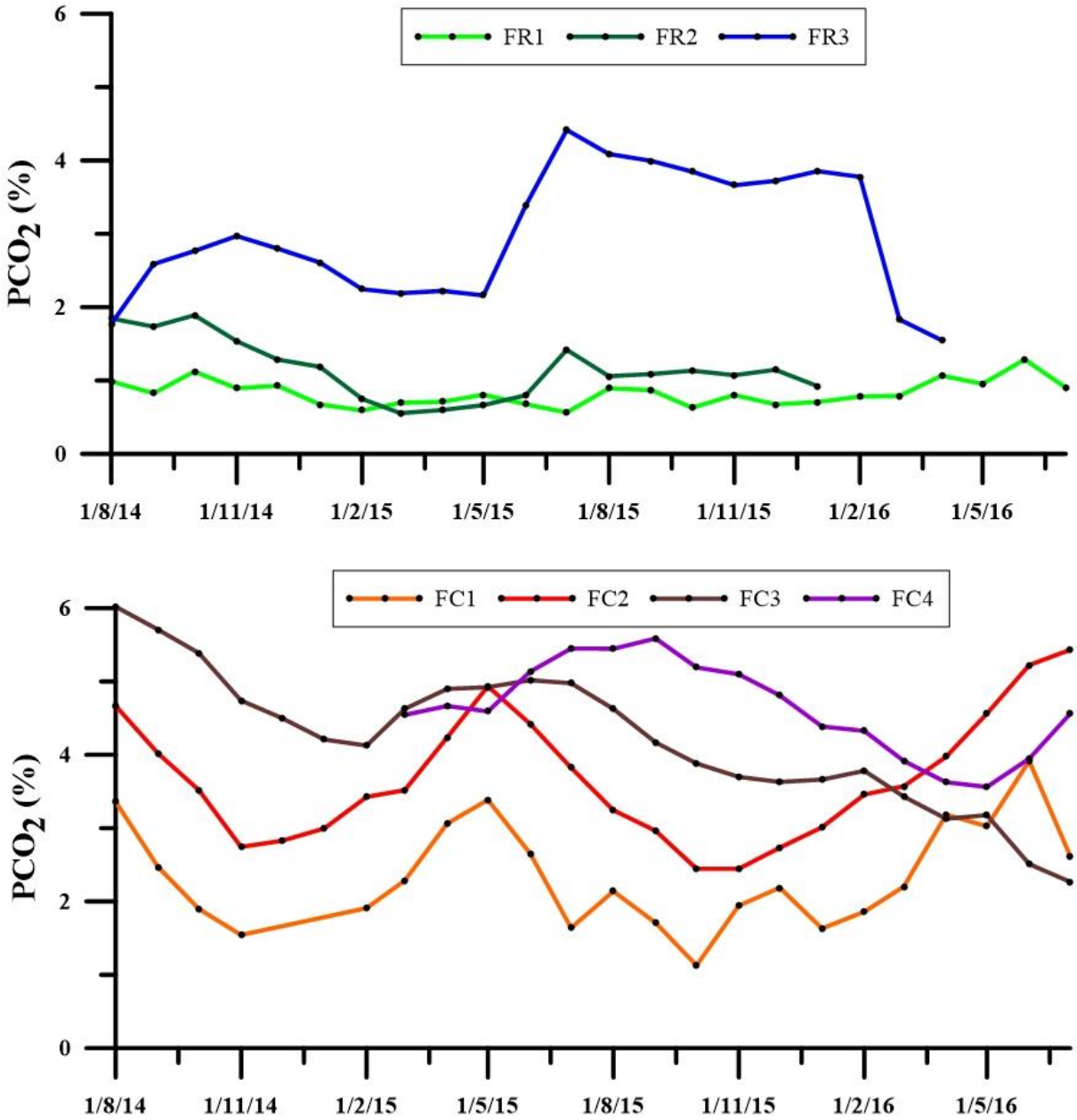


Figure III-20 : Evolution des moyennes mensuelles des teneurs en CO2 mesurées dans FR1, FR2, FR3 (haut) et FC1, FC2, FC3, FC4 (bas).

Les teneurs en CO_2 moyennes à 1 m de profondeur dans les altérites (FR1) sont faibles et assez stables (de 0.58 à 1.20 %) au cours de l'étude comparativement aux autres points de mesure. Cependant des variations sont observées avec notamment des valeurs plus importantes

à la fin des étés 2014 et 2015 mais aussi au cours du printemps 2016. Les valeurs les plus faibles sont quant à elles enregistrées au cours du printemps et de l'automne 2015.

A 2 m de profondeur dans les altérites (FR2), les teneurs en CO_2 sont globalement plus élevées et variables (0.55 à 1.85 %). Les valeurs les plus élevées sont rencontrées d'Août à Octobre 2014. S'en suit une forte diminution jusqu'à une valeur minimale de 0.55 % au mois de Mars 2015. La teneur en CO_2 augmente alors doucement jusqu'au mois de Juin 2015 pour atteindre ensuite un pic de concentration à 1.40 % au mois de Juillet 2015. Une diminution est ensuite observée jusqu'au mois de Décembre 2015, date de la panne du capteur.

Un mètre plus en profondeur (FR3), les teneurs en CO_2 sont beaucoup plus importantes et varient fortement au cours des deux années d'enregistrement (1.55 à 4.46 %). La teneur en CO_2, peu élevée au début des enregistrements en Août 2014, croît jusqu'en Novembre 2014. Une diminution est ensuite observée pendant l'hiver et le printemps 2015. La PCO_2 augmente alors fortement pour atteindre une valeur maximale en Juillet 2015 (4.46 %), suivie d'une lente diminution et d'un palier jusqu'au mois de Janvier 2016 (3.80 %). Enfin, une forte décroissance de la teneur en CO_2 est enregistrée dans le forage pour atteindre au moment de la panne du capteur une PCO_2 de 1.50 %, plus cohérente avec celles enregistrées au cours des premiers mois de l'étude. Ces variations importantes semblent laisser transparaitre deux dynamiques différentes au cours du temps. En effet, comme nous pouvons le voir dans la Figure III-20, les teneurs en CO_2 maximales semblent coïncider avec celles enregistrées à la même profondeur dans les calcaires (FC3).

Intéressons-nous aux teneurs en CO_2 mesurées dans les forages de l'épikarst avec en premier lieu celles du forage le moins profond (FC1). Les moyennes mensuelles de ce point de mesure montrent des valeurs variables de CO_2 conditionnées par une variabilité saisonnière importante (1.13 à 3.92 %). En effet, les teneurs en CO_2 les plus importantes sont mesurées généralement de Mai à Août avec toutefois un déphasage temporel selon les années. A contrario, les PCO_2 les plus faibles sont observées de la fin de l'automne au début de l'hiver. Cette variabilité saisonnière que l'on peut assimiler à une sinusoïde de période un an, semble pour le moment être imputable à la variation de la production de CO_2 dans les sols sus-jacents qui comme nous l'avons vu précédemment, est maximale au cours des mois de printemps et d'été. Cependant, la diminution des teneurs en CO_2 au cours de l'été et l'augmentation précoce dès le mois de Janvier laissent présager de l'influence d'autres mécanismes physiques sur la dynamique du CO_2 dans cette zone de l'épikarst.

Le point de mesure FC2 montrent des teneurs en CO_2 plus élevées (2.45 à 5.30 %) que dans FC1. La variabilité saisonnière est toutefois similaire et ne présente aucun déphasage temporel là où l'on aurait pu en attendre un du fait de l'éloignement de la zone productrice. Cependant, la fracturation importante de l'épikarst à cette profondeur doit permettre des échanges rapides entre les différentes profondeurs.

Pour ce qui est des teneurs en CO_2 à 3 m de profondeur dans l'épikarst (FC3), deux phases différentes sont successivement observées au cours de l'étude, avec d'abord une variation sinusoïdale similaire aux forages FC1 et FC2 bien que cette dernière est moins importante à cette profondeur, puis une phase de diminution observée à partir du mois de Janvier 2016 qui mène à une valeur minimale de 2.16 % en Juillet 2016. Ainsi, dans un premier temps, des teneurs en CO_2 importantes sont mesurées au mois d'Août 2014 (6.00 %), puis ces dernières diminuent jusqu'en Janvier 2015 (4.13 %). Les valeurs moyennes augmentent ensuite pour atteindre un palier (5.00 %) de Mars à Juin 2015. Les concentrations en CO_2 décroissent ensuite pour atteindre une valeur de 3.80 % au mois de Janvier 2016. C'est à partir de cette période qu'une décroissance jamais mesurée en ce point au cours de l'année 2015, apparait jusqu'à atteindre une teneur minimale en Juillet 2016.

Enfin, les teneurs en CO_2 moyennes enregistrées dans le forage le plus profond (FC4) sont moins variables que dans les forages plus superficiels (3.56 à 5.60 %), mais semblent tout de même suivre une tendance saisonnière similaire. En effet, les teneurs en CO_2 augmentent à la fin de l'hiver, diminuent au mois d'Octobre 2015 et croissent à nouveau à partir du mois de Mai 2016. Cependant, ces variations sont temporellement déphasées du fait de l'éloignement de la zone productrice de CO_2. De plus, les données enregistrées montrent des teneurs moyennes plus élevées dans ce forage bien que certaines périodes de l'année ne valident pas cette observation, comme le printemps 2015 au cours duquel les teneurs en CO_2 de FC4 sont inférieures à celles de FC2 et FC3, mais aussi le printemps 2016 durant lequel les PCO_2 les plus importantes sont enregistrées à 2 m de profondeur (FC2). Enfin, il est important de noter que contrairement au forage FC3, les teneurs en CO_2 de FC4 augmente à partir du mois d'Avril 2016.

Ainsi, plusieurs comportements ou dynamiques différentes sont mises en lumière à partir des PCO_2 enregistrées dans les différents forages de la parcelle expérimentale. Ces dernières laissent présager d'une multitude de mécanismes physiques l'influençant à des degrés

divers. La compréhension de ces mécanismes complexes passera donc par l'interprétation de ces variations spatio-temporelles en considérant :

- La variabilité spatio-temporelle de la production de CO_2 dans les différents sols de la parcelle expérimentale,
- Les variations des conditions hydroclimatiques atmosphériques (température, pression atmosphérique, pluviométrie, *etc.*),
- Les propriétés physiques des différents encaissants (calcaires épikarstiques fracturés, altérites sablo-argileuses poreuses),
- Les variations des paramètres hydroclimatiques enregistrées dans les altérites de la parcelle expérimentale (températures, pression, teneurs en eau volumique),

III.3.1.4 Les paramètres hydroclimatiques

Deux années d'enregistrement réalisées dans la parcelle expérimentale sont disponibles. Les paramètres hydroclimatiques à notre disposition pour l'étude de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst Lascaux sont les suivants :

- Les teneurs en eau volumiques et températures mesurées à différentes profondeurs dans les altérites (0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5 et 2.0 m),
- La température extérieure et la pluviométrie,
- La pression atmosphérique externe et dans les altérites et l'épikarst.

Il est important de signaler dès à présent que les données de tensiométrie et teneurs en O_2 ne sont pas utilisées dans ce manuscrit du fait de problèmes rencontrés lors de leur implantation et de l'acquisition des données. La Figure III-21 présente certaines séries de données temporelles des différents paramètres utilisés ultérieurement pour l'analyse de la dynamique du CO_2.

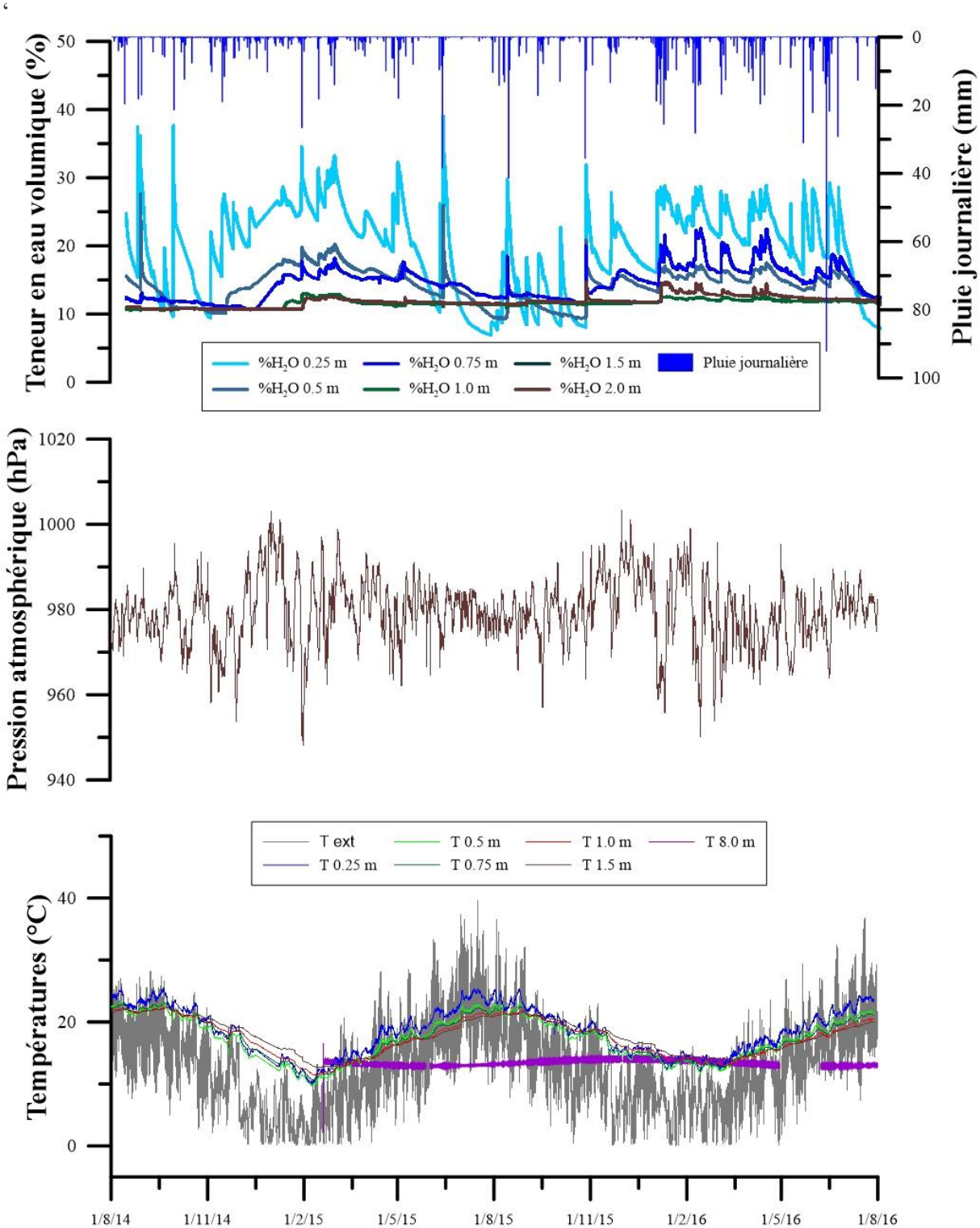


Figure III-21 : Evolution des paramètres hydroclimatiques de l'atmosphère et des altérites. (1) Pluies journalières et teneurs en eau volumiques à 0.25 et 0.5 m de profondeur, (2) Pression atmosphérique et (3) températures extérieures et du sol à différentes profondeurs

Comme pour l'analyse de l'évolution des teneurs en CO_2 dans les différents forages, il est décidé dans cette partie de s'intéresser en particulier aux statistiques descriptives et à l'évolution des moyennes mensuelles des différents paramètres hydroclimatiques.

Le Tableau III-5 résume les principales statistiques décrivant les paramètres hydroclimatiques. La pression atmosphérique n'est pas présentée ici, car les statistiques descriptives de ce paramètre n'apportent que très peu d'enseignements.

Tableau III-5 : Statistiques descriptives calculées à partir des séries temporelles complètes (Août 2014 à Août 2016) des différents paramètres hydroclimatiques acquis au cours des travaux de thèse (T : températures, H : teneur en eau volumique).

	Moyenne	**Ecart type**	**Cv (%)**
%H (0,2m)	20.06	6.38	32%
%H (0,5m)	14.23	2.52	18%
%H (0,75m)	14.55	2.37	16%
%H (1,0m)	11.56	0.53	5%
%H (1,5m)	11.82	0.81	7%
%H (2,0m)	12.27	0.48	4%
T 0.25 (°C)	14.24	3.72	26%
T 0.5 (°C)	13.01	3.36	26%
T 0.75 (°C)	13.18	3.14	24%
T 1 (°C)	13.15	2.88	22%
T 1.5 (°C)	13.47	2.59	19%
T 2 (°C)	12.63	4.42	35%
T FC4 (°C)	13.33	0.41	3%

La teneur en eau volumique moyenne et sa variabilité décroissent avec la profondeur dans les altérites. Cependant, ce paramètre ne présage en rien de la saturation en eau du milieu. En effet, la teneur en eau volumique décrit le volume total occupée par l'eau dans un volume unitaire d'encaissant. Ainsi, pour obtenir la saturation en eau, il est nécessaire de connaitre la valeur de la porosité selon la profondeur (donnée que nous n'avons pas à notre disposition). Nous considérerons donc l'encaissant comme saturé en eau lorsqu'un plateau maximal sera atteint (tout le volume poreux est alors rempli d'eau). Cette considération sera importante pour la suite de nos interprétations.

Les températures mesurées dans les altérites présentent un comportement inattendu avec des valeurs moyennes qui décroissent d'abord dans les premiers 50 cm, augmentent ensuite jusqu'à 1.5 m de profondeur pour finalement diminuer à 2.0 m. Ces tendances ne semblent pas logiques. Il en est de même pour le coefficient de variation de la température mesurée à 2.0 m de profondeur (35%). Les valeurs absolues des températures mesurées dans les altérites ne doivent donc pas être considérées comme représentatives du milieu. Pour assurer des interprétations représentatives du milieu du point de vue de l'évolution des températures, le

parti est pris de se baser sur des valeurs de températures estimées à partir des températures extérieures (moyenne journalière). Pour cela, une méthode numérique résolvant les problèmes de conduction thermique en régime transitoire est appliquée. La répartition des températures initiales est connue mais sa variation en fonction du temps doit être estimée. Il est, par conséquent, nécessaire de déduire la nouvelle répartition des températures à partir d'une répartition antérieure connue. Le modèle utilisé est décrit en **Annexe 5**.

La solution numérique a ainsi été appliquée à partir de l'année 1963 (première mesure cohérente de la température extérieure) pour obtenir des valeurs de température initiales à chaque point du maillage acceptables au début de notre période d'étude. La principale difficulté résidant dans la détermination de (a) par calage. Pour cela, la modélisation a été effectuée à partir des paramètres utilisés par Malaurent et al. (2005) qui utilisent ce modèle pour déterminer la répartition spatio-temporelle des températures dans la Grotte de Lascaux. Les statistiques descriptives des températures moyennes journalières simulées jusqu'à 10 mètres de profondeur sont présentées dans le Tableau III-6 :

Tableau III-6 : Statistiques descriptives des températures simulées de 1 à 10 mètres de profondeur dans les calcaires épikarstiques pour la période allant du 01/08/2014 au 01/08/2016.

	Extérieur	**1 m**	**2 m**	**3 m**	**4 m**	**5 m**	**6 m**	**7 m**	**8 m**	**9 m**	**10 m**
Moyenne (°C)	12.46	12.43	12.43	12.42	12.42	12.42	12.41	12.40	12.40	12.39	12.39
Ecart type	6.06	3.83	2.67	1.88	1.33	0.94	0.66	0.47	0.33	0.24	0.17
Coefficient de variation	49%	31%	21%	15%	11%	8%	5%	4%	3%	2%	1%

Ainsi, comme attendu, la variabilité décroit considérablement avec la profondeur, les valeurs absolues étant plus importante en surface qu'en profondeur du fait du déphasage temporel provoqué par le temps d'arrivée de l'onde thermique en profondeur. En effet, durant le mois d'Août, les températures extérieures et des premiers mètres de l'épikarst sont maximales quand celles estimées plus en profondeur sont encore affectée par l'onde thermique hivernale. L'évolution des différences de température entre les différentes profondeurs dans l'épikarst seront utiles pour interpréter les possibles échanges de masses d'air entre les différents points de mesure des teneurs en CO_2 dans les différents forages.

La Figure III-22 montre l'évolution des cumuls mensuels des précipitations et des moyennes mensuelles des teneurs eau volumiques. Les températures simulées à différentes

profondeurs dans l'épikarst ainsi que les moyennes mensuelles des températures extérieures sont aussi présentées dans cette Figure III-22.

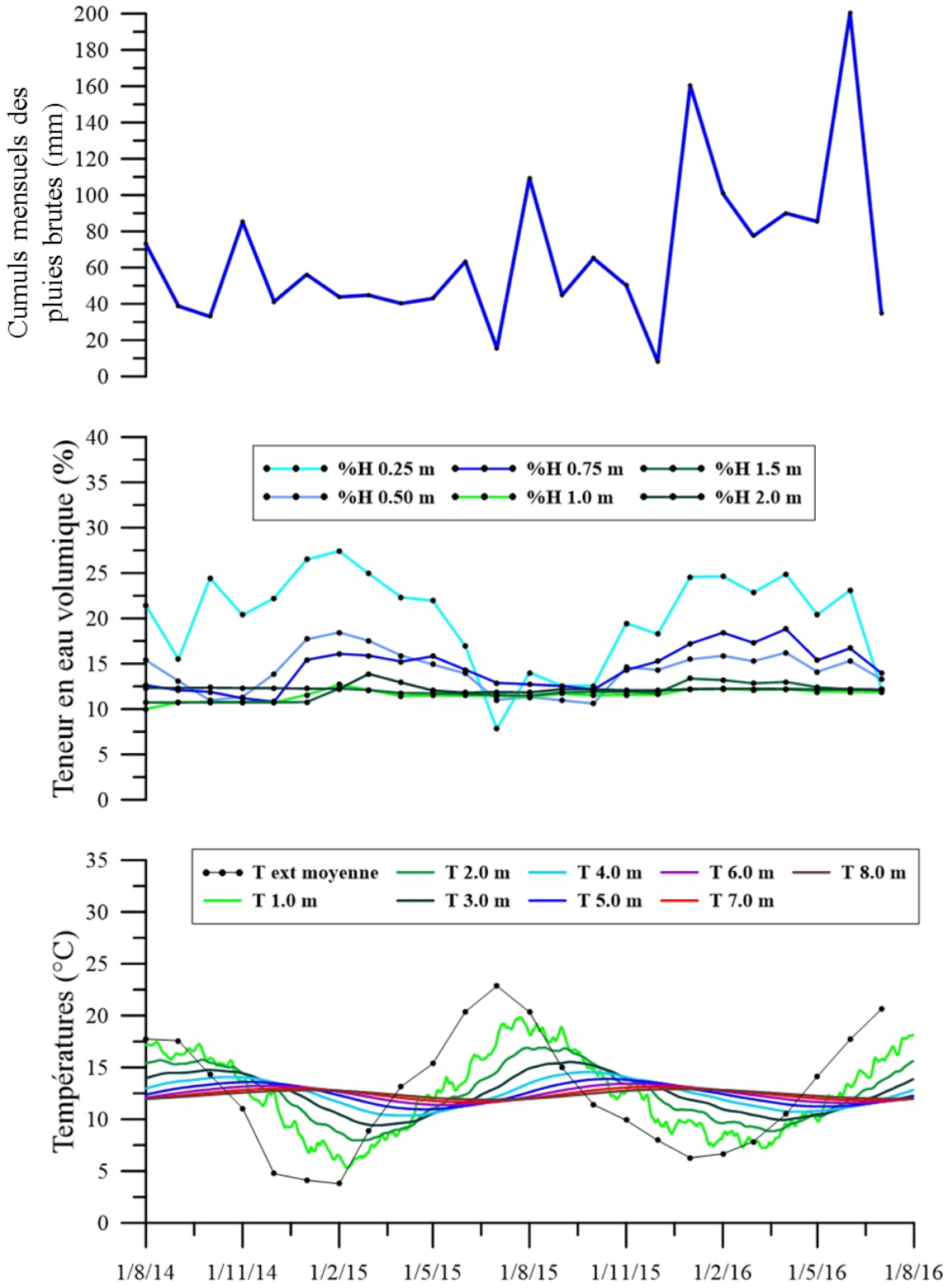


Figure III-22 : Evolution des cumuls mensuels de pluie (1) et des moyennes mensuelles des teneurs en eau volumiques (2). Les températures estimées à différentes profondeurs dans les calcaires ainsi que les moyennes mensuelles de la température extérieure sont aussi présentées (3).

L'analyse des différentes séries temporelles de températures montre une atténuation de la variabilité de ces dernières avec la profondeur. Les valeurs moyennes minimales et maximales de ces différents points de mesure sont atteintes à des périodes différentes de l'année. Cette observation est expliquée par le déphasage temporel de l'arrivée de l'onde thermique avec la profondeur. Ainsi, il est communément admis que pour une épaisseur de calcaire de 8 m, le temps de trajet de l'onde avoisinera les 6 mois. Ce phénomène de retard pourrait avoir un impact sur les mouvements des gaz dans l'encaissant selon la profondeur, et donc sur la teneur en CO_2 du milieu.

Pour ce qui est des teneurs en eau volumiques, ces dernières semblent anti-corrélées avec les températures. En effet, les altérites voient leur teneur en eau augmenter de la fin de l'automne jusqu'au début de l'été sous l'impact combinées de l'augmentation de la pluviométrie et de la diminution de l'activité végétale consommatrice d'eau et donc l'évapotranspiration potentielle (ETP). Une diminution est ensuite observée au cours de l'été. Une grande différence est observée entre les mesures réalisées aux différentes profondeurs. En effet, la variabilité la plus importante est observée pour la mesure la plus superficielle. Les valeurs maximales sont aussi les plus importantes. Ces constats proviennent d'une part de la forte influence de l'ETP et des pluies dans cet horizon superficiel, mais aussi de la plus forte porosité du sol en surface par rapport aux points de mesure plus profonds.

III.3.1.5 Les données isotopiques

Pour ce qui est du signal isotopique du CO_2 dans les différents forages de la parcelle expérimentale, trois campagnes de mesures ont été réalisées au cours des travaux de thèse. Elles sont réparties du 05/12/2014 au 23/02/2016 avec une première campagne réalisée à la fin de l'automne, une seconde au milieu du printemps et enfin une troisième durant l'hiver. Les mesures obtenues doivent permettre d'une part de s'assurer que le CO_2 présent dans les sols provient exclusivement de la respiration racinaire et de la dégradation de la matière organique. D'autre part, ces dernières pourront apporter des informations quant aux processus de fractionnement isotopique ayant pu affecter la composition isotopique du CO_2 selon les formations géologiques et la profondeur d'investigation. Les différentes mesures isotopiques réalisées par le passé dans les sols de la cavité de Lascaux seront aussi des éléments d'interprétation de l'origine de ce CO_2.

Les différentes données à notre disposition sont présentées dans le Tableau III-7.

Tableau III-7 : Récapitulatif des signaux isotopiques du CO_2 prélevé dans les différents forages de la parcelle expérimentale. Les données sont exprimées en $\delta^{13}C_{CO2}$ (‰).

	FR 1	FR 2	FR 3	FC 1	FC 2	FC 3	FC 4	Sol
24/04/1998								-24.1
05/10/1998								-21.6
15/09/2003								-22.1
15/01/2004								-22.0
05/12/2014	-24.2	-25.0	-26.7	-24.2	-24.4	-24.6	-22.0	
04/05/2015	-22.5	-22.8	-20.1	-22.3	-22.5	-24.7	-21.4	
23/02/2016	-19.6	-20.1	-19.9	-21.1	-23.9	-22.3	-21.1	

Les valeurs obtenues après analyses isotopiques dénotent toutes d'une origine biogénique du CO_2. Le $\delta^{13}C_{CO2}$ évolue de -24.1 à -21.6‰ dans les sols. Les mesures de l'air des forages de la parcelle expérimentales montrent des valeurs comprises entre -26.7 et -19.6‰. La variabilité de ce signal isotopique du CO_2 aussi bien avec la profondeur que selon la formation géologique encaissante ou encore la période de prélèvements dénote de mécanismes complexes responsables de la dynamique du CO_2.

III.3.1.6 Les difficultés rencontrées

Plusieurs difficultés concernant les mesures réalisées dans la parcelle expérimentale ont été rencontrées au cours des trois années de thèse. Ces dernières peuvent être classées selon trois ordres :

- Les capteurs non adaptés à la mesure in-situ en continu dans la zone vadose avec les oxymètres chimiques et les tensiomètres. Dès leur installation, les teneurs en O_2 dans l'air des différents forages ont été impactés par une dérive négative (la valeur de PO_2 décroît sans explication physique). Il s'est avéré que ces capteurs chimiques consommaient l'oxygène présent dans l'air du massif pour réaliser la mesure. Ce gaz n'étant pas renouvelé dans les zones de mesure du fait de l'absence de photosynthèse dans le milieu, les teneurs en O_2 mesurées diminuaient donc continuellement et ne garantissaient pas une mesure représentative de la dynamique de ce gaz qui devait permettre de vérifier son anti corrélation avec les PCO_2 (une molécule $_{d'O2}$ consommée pour une molécule de CO_2 produite). Les tensiomètres n'ont quant à eux pas pu être tous implantés comme défini dans le cahier des charges initial. En effet, ce dispositif de mesure est bien adapté aux sols sableux peu compactés, mais ne l'est aucunement à plus de 1 m de profondeur dans les altérites compactes qui plus est lorsque de nombreux rognons de silex sont présents. La mise

en place est alors compliquée, si ce n'est impossible, d'autant plus que la tarière à utiliser pour implanter ces capteurs ne mesure que 30 mm de diamètre. Néanmoins, deux tensiomètres ont tout de même été installés à 0.25 et 0.75 m de profondeur dans les altérites de la parcelle expérimentale.

- Les capteurs insuffisamment précis et sensibles pour les mesures voulues avec notamment les capteurs de températures présents dans les ML3 ThetaProbe (initialement prévus par la mesure de la teneur en eau volumique). Ces sondes de températures se sont avérées peu précises et enclins à une dérive importante non linéaire et donc non compensable. C'est pourquoi, les températures utilisées pour les analyses suivantes ont été simulées à partir du modèle décrit en **Annexe 5**.
- Les pannes de capteurs de PCO_2, PO_2 et de pression atmosphérique. Les capteurs de PO_2 bien que peu représentatifs de la valeur de PO2 du massif auraient pu être utiles pour déterminer si des apports d'air atmosphérique plus chargé en oxygène étaient présents à différentes profondeurs dans le massif. Cependant, l'humidité importante dans les chambres de mesure protégée par la membrane PTFE a conduit à la panne rapide de ces capteurs. Pour ce qui est des capteurs de pression atmosphérique, ces derniers n'étaient pas implantés dans la poche de protection pour permettre de mesurer la présence d'eau à la profondeur du forage. Ces derniers sont alors pour la plupart tombés en panne du fait de la présence de résidus sableux qui ont possiblement lésés la membrane de mesure. Toutefois, deux capteurs sont toujours en marche à ce jour. Enfin, les carbonimètres (mesure de la PCO_2) ont pour la plupart bien résisté à la forte humidité présente dans l'épikarst et les altérites. Cependant, de forts épisodes d'infiltration suite à des pluies intenses, ont provoqués la rupture sous l'effet de la charge hydraulique, de la membrane hydrophobe protectrice. Ce phénomène est à l'origine de la panne des capteurs des forages FR2 et FR3 présents dans les altérites. Il est en revanche plus probable que la panne du capteur du forage FC1 soit due à une mauvaise isolation de la chambre protectrice. En effet, ce capteur a été remplacé au début de l'année 2015, et reste pour le moment toujours opérationnel malgré les fortes précipitations observées sur le site de Lascaux au cours de l'année 2016.

III.3.2 Origine et répartition spatio-temporelle du CO_2 dans les sols de la parcelle expérimentale

Cette première analyse a pour objectif de préciser d'abord l'origine du CO_2 présent dans les sols et l'épikarst ainsi que l'évolution de la production du CO_2 dans les différents sols et les forages de la parcelle expérimentale. Enfin, les paramètres influençant les flux de CO_2 émanant du sol seront discutés.

III.3.2.1 Le signal isotopique du δ13C-CO_2, marqueur de l'origine du CO_2

Dans un premier temps, l'interprétation des données isotopiques à notre disposition permet d'affirmer que le CO_2 présents dans les différents sols ainsi que dans les 7 forages, provient d'une origine dite « biogénique ». En effet, les valeurs mesurées variant de -24.1 à -21.6 ‰ dans les sols au-dessus de la cavité, et de -26.7 à -19.7 ‰ dans les forages de la parcelle expérimentale, ne laisse que peu de doutes quant à la participation importante de la respiration autotrophe et hétérotrophe des sols. Il est aussi possible de préciser que ces valeurs sont typiques des végétaux dits C3, c'est-à-dire ayant un cycle de la photosynthèse au cours duquel le CO_2 est fixée par condensation sur la ribulose 1.5-bisphosphate. Ces végétaux représentent la quasi-totalité des espèces présentes sur le site de la grotte de Lascaux.

La Figure III-23 présente les différentes valeurs de $\delta^{13}C$-CO_2 mesurées en fonction de la profondeur, dans les différents forages de la parcelle expérimentale suite aux trois campagnes de prélèvement.

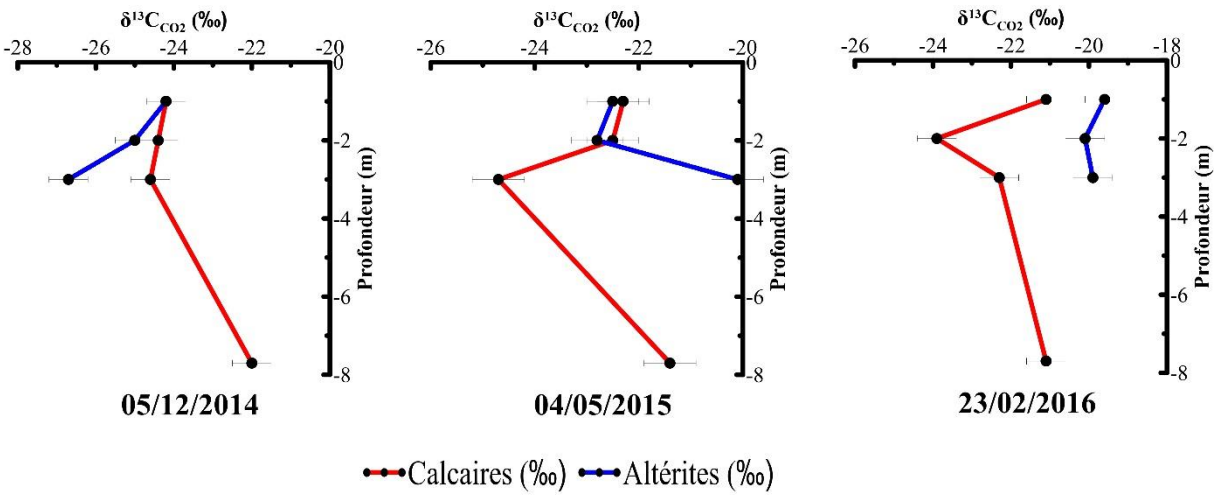


Figure III-23 : Signal isotopique du CO_2 mesuré dans les forages de la parcelle expérimentale, exprimé en fonction de la nature de l'encaissant, la profondeur de prélèvement ainsi que la campagne d'étude.

Le CO_2 de l'air du sol est donc appauvri en carbone 13 par rapport au CO_2 de l'air atmosphérique, tout comme celui de l'air de l'épikarst et des altérites sous-jacentes. Cependant, comme le montre la Figure III-23, les valeurs mesurées sont très variables et évolutives selon la profondeur, l'encaissant et la période de mesure. Cette variabilité importante ne peut être imputée à un changement quelconque dans les mécanismes de production de CO_2 sur le site d'étude. Il est alors cohérent de penser que ces variations résultent de phénomènes de fractionnements isotopiques tels que le transfert ou les échanges avec les eaux d'infiltration, mais aussi de phénomènes de mélanges mettant en lumière une participation plus ou moins importante de différentes masses d'air (atmosphère, sol, zone vadose, *etc.*) dans la composition de l'air souterrain. Ces hypothèses seront discutées ci-après en prenant en compte les mécanismes responsables de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose superficielle de la colline de Lascaux.

III.3.2.2 La dynamique du CO_2 dans les sols

L'étude de la répartition spatio-temporelle des PCO_2 dans les sols est une première étape dans l'analyse de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst. En effet, il s'avère important d'apprécier la variabilité spatio-temporelle de la production du CO_2 dans les sols du site d'étude, ainsi que les paramètres responsables de cette dynamique. Pour cela, il est dans un premier temps entreprit d'analyser les cartes d'interpolation (méthode IDW) des teneurs en CO_2 mesurées dans les sols au cours des campagnes de Mars 2013 à Février 2014 (Figure III-24).

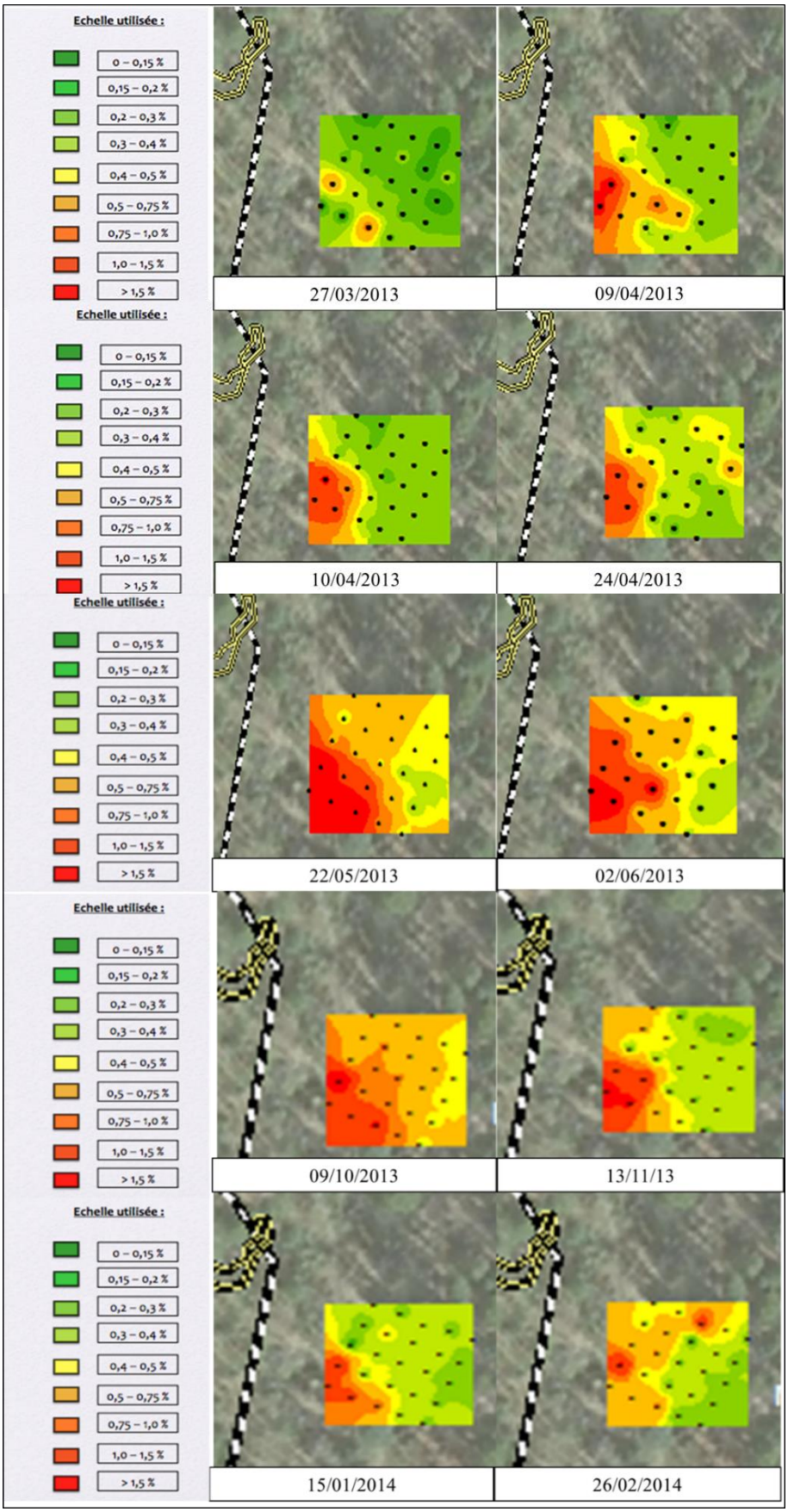


Figure III-24 : Evolution de la répartition spatiale des teneurs en CO_2 interpolées par la méthode IDW dans les calcisols leptiques et les brunisols pseudoluviques.

Dans un premier temps (27/03/2013), une première tendance se dessine avec la présence de teneurs en CO_2 plus élevées dans les sols situés sur du calcaire à faible profondeur. Il semble donc que la production soit plus forte à cette période de l'année dans les calcisols que dans les brunisols.

Nous remarquons ensuite (09/04/2013) une augmentation assez forte de la teneur en CO_2 dans tous les sols. En effet, les teneurs ont été pour la plupart multipliée par deux. De plus, nous constatons une accentuation de la tendance observée précédemment. Les points de mesure situés dans les calcisols ont montré des teneurs comprises entre 0,75 et 1,5 %. Cette tendance se poursuit ensuite jusqu'à la campagne de mesure du 22/05/2013. A cette date, une forte augmentation des teneurs en CO_2 apparait sur la quasi-totalité de notre zone. En effet, à l'exception des points de mesures situés à l'Est de notre maillage, les teneurs en CO_2 prennent des valeurs allant de 0,75% à 3% pour les points situés dans les calcisols. Ces résultats montrent donc que la production de CO_2, a possiblement augmenté de manière significative du fait de la reprise de l'activité biologique. Comme précédemment, les teneurs en CO_2 restent beaucoup plus élevées dans les calcisols, avec un maximum de 3%. Ces sols semblent donc être bien plus propice à l'établissement d'une activité bio-photosynthétique. Les mesures effectuées par Poulenard et al. (2014) ont montré que le pH de la solution contenue dans les altérites était acide (pH = 4). Or comme nous l'avons évoqué précédemment (III.1.1.2.2), l'activité biologique et surtout l'activité enzymatique de certains micro-organismes producteurs de CO_2 peut être réduite en présence d'un sol dit « acide », expliquant ainsi les différences de production de CO_2 dans ces différents sols.

La campagne suivante (02/06/2013) montre une répartition spatiale des PCO_2 similaires avec cependant des teneurs en CO_2 plus basses. Il est alors important de noter que malgré l'augmentation des températures et de l'activité bio-photosynthétique, les teneurs en CO_2 relevées sont plus faibles que lors du mois de Mai 2013. Il n'y a donc pas de raison de supposer que cette diminution est liée à une simple baisse de la production de CO_2 dans les sols. Ceci nous amène à penser que la teneur en eau du sol influence la teneur en CO_2 des sols sur notre site d'étude. La question étant maintenant de savoir si l'augmentation de la teneur en eau dans les sols a pour conséquence d'augmenter la production de CO_2 et/ou de permettre son accumulation en contraignant les échanges avec l'atmosphère. La Figure III-25, montre bien que les teneurs en CO_2 dans les calcisols sont plus importantes durant les périodes pluvieuses.

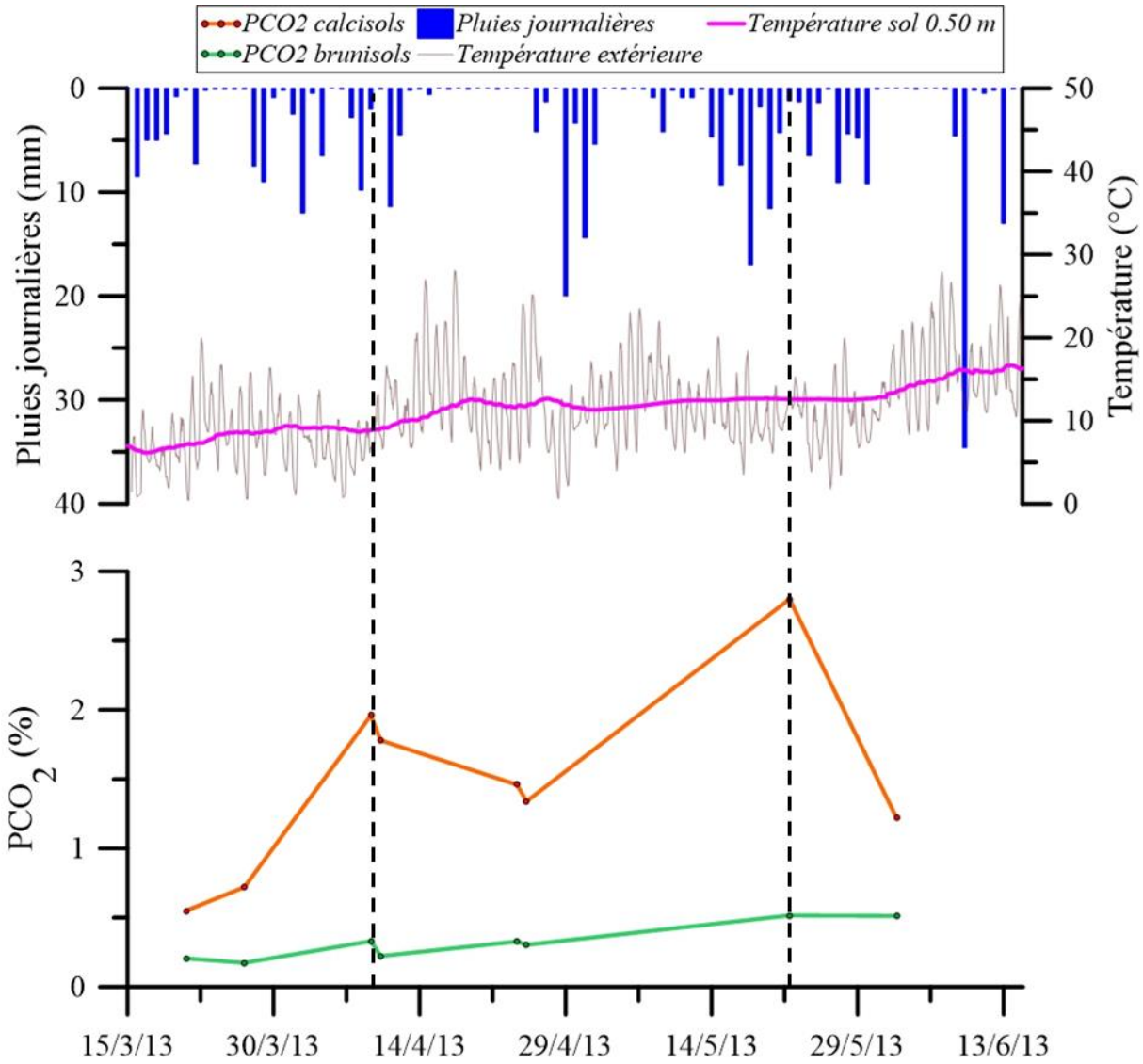


Figure III-25 : Zoom sur l'évolution des cumuls de pluie journalier (1), des températures atmosphériques et du sol à 0.5 m de profondeur (2) des teneurs en CO2 mesurées en deux points du maillage (3) mesurés de Mars 2013 à Juin 2013. Les pointillés marquent l'influence de la pluviométrie et donc de la teneur en eau sur la PCO2 dans les calcisols.

Au cours du mois d'Octobre 2014, les teneurs en CO_2 sont maximales aussi bien dans les calcisols que dans les brunisols avec toutefois des valeurs près de 4 fois plus fortes dans les calcisols (3.85 % contre 1.05 %). Là encore, la teneur en eau du sol semble être responsable de ces fortes teneurs en CO_2. La production de CO_2 dans les sols reste donc importante au cours du mois d'Octobre 2014. Enfin les trois dernières campagnes de mesure montrent une diminution importante des teneurs en CO_2 dans les brunisols et moindre dans les calcisols. Une inflexion de la production de CO_2 dans les sols causée par une diminution de la température explique ce comportement.

En résumé, les différentes campagnes de mesure des teneurs en CO_2 dans les sols de la parcelle expérimentale démontrent une production de CO_2 plus importantes dans les calcisols que dans les brunisols. Cette production est plus importante de Mars à Octobre sous l'influence de la température du sol et tend à décroître suite à l'arrivée des températures hivernales. Enfin, cette analyse a aussi démontré l'impact de la pluviométrie et donc de la teneur en eau du sol sur la PCO_2 mesurée.

III.3.2.3 Influence de la teneur en eau sur la variabilité temporelle des flux de CO_2 émanant des sols de la parcelle expérimentale

Pour comprendre l'impact de la teneur en eau sur la PCO_2 du sol, nous disposons de trois mois de mesure des flux de CO_2 émanant des calcisols. L'évolution du flux enregistré au cours du mois de Juin 2016 est ainsi présentée en Figure III-26 avec en parallèle les paramètres hydroclimatiques pouvant influencer ce dernier tels que la pression atmosphérique, la pluviométrie ou encore la différence entre la température atmosphérique et celle du sol, mais aussi les teneurs en eau mesurées dans les sols en continu.

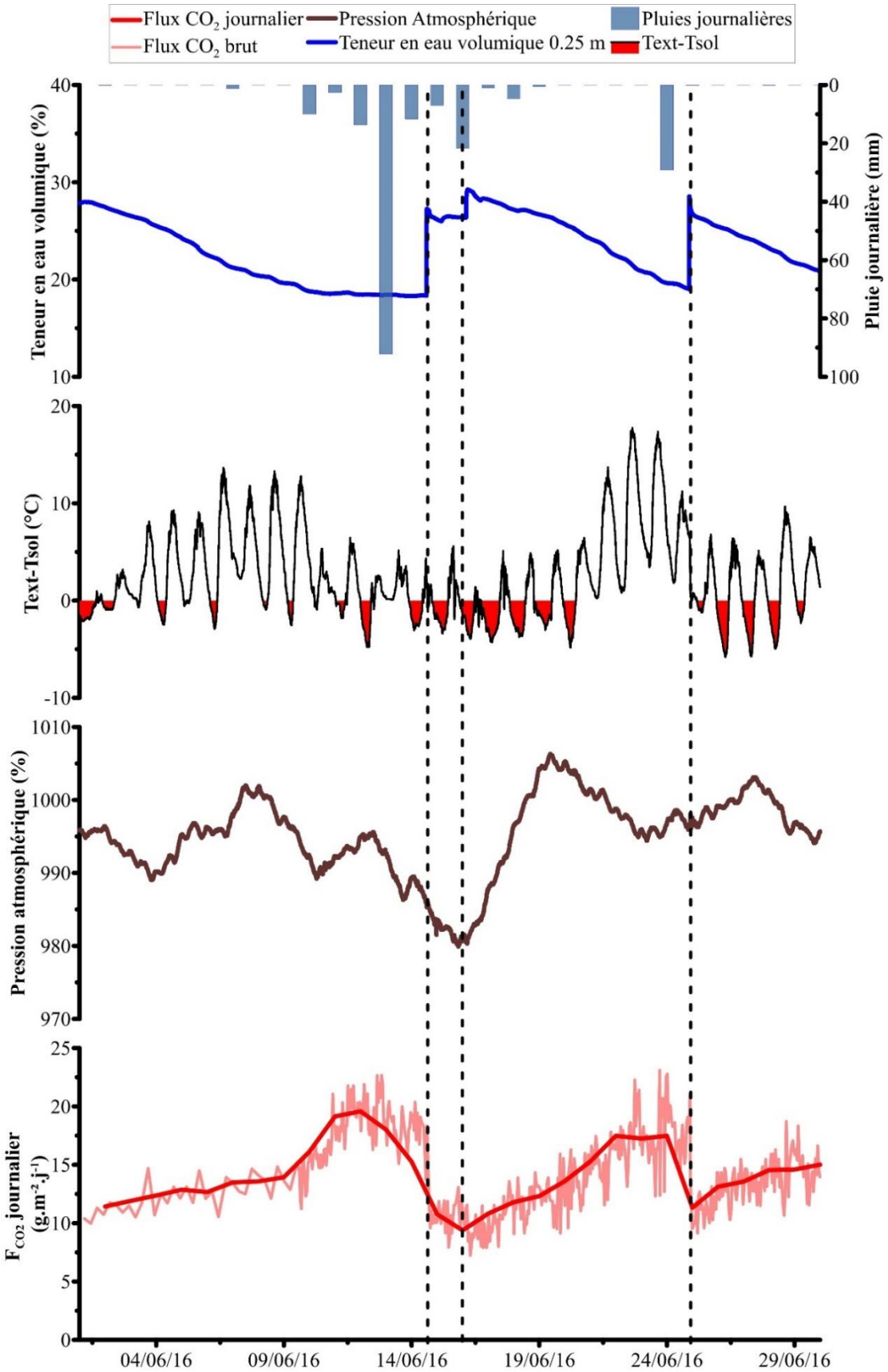


Figure III-26: Evolution de la teneur en eau du sol et de la pluviométrie (1), de la différence entre la température atmosphérique et du sol à 0.5 m de profondeur (2), de la pression atmosphérique (3) mais aussi des flux de CO_2 émanant des calcisols (4). Les points-tillés marquent les diminutions du flux de CO_2 suite à l'augmentation de la teneur en eau du sol.

L'analyse de la variabilité temporelle du flux de CO_2 vient confirmer l'influence importante de la teneur en eau du sol. A contrario, la corrélation au cours du mois de Juin entre la variabilité du flux de CO_2 et les autres paramètres hydroclimatiques n'est pas démontrée. Ainsi, le flux augmente au début du mois de Juin pour atteindre 20 $g.m^{-2}.j^{-1}$ le 13 Juin, quand la teneur en eau du sol diminue peu à peu sous l'influence du drainage et de l'évapotranspiration. Puis, le flux de CO_2 est divisé par deux brusquement (de 20 à 10 $g.m^{-2}.j^{-1}$) en réponse à l'augmentation de teneur en eau enregistrée suite à la sollicitation pluvieuse du 14 Juin. Suite au passage du front d'infiltration, le flux de CO_2 augmente à nouveau pour atteindre 23 $g.m^{-2}.j^{-1}$. Ce phénomène se reproduit à nouveau suite à l'épisode pluvieux du 24 Juin.

Le front d'infiltration semble donc dans un premier temps limiter les échanges entre sol et atmosphère en diminuant considérablement la porosité effective du sol, c'est-à-dire les vides permettant au gaz de s'échapper. Comme cité auparavant, la teneur en CO_2 dans le sol est la résultante de la production à laquelle il faut soustraire la masse de CO_2 soustraite à cet horizon par les processus de transfert descendant (vers la profondeur) et ascendant (vers l'atmosphère). Les échanges diminuant, il n'est pas incohérent de penser que la teneur en CO_2 augmente sous la « chape » d'eau par un processus d'accumulation atteignant alors 3.56 % dans certaines zones de la parcelle expérimentale. Le CO_2 continue en effet à être produit dans cet horizon sans que ce dernier ne puisse s'échapper vers l'atmosphère ce qui a pour conséquence une augmentation de la PCO_2. Cette augmentation de la PCO_2 vient ensuite expliquer l'augmentation du flux de CO_2 suite à la phase de drainage de l'eau. En effet, les vides sont à nouveau disponibles pour les échanges avec l'atmosphère, laissant ainsi le processus de diffusion se remettre en place. Le différentiel entre la PCO_2 atmosphérique et celle du sol étant plus important, le flux de CO_2 émanant du sol par diffusion croît alors fortement. Le schéma conceptuel présenté en Figure III-27 explique ce processus.

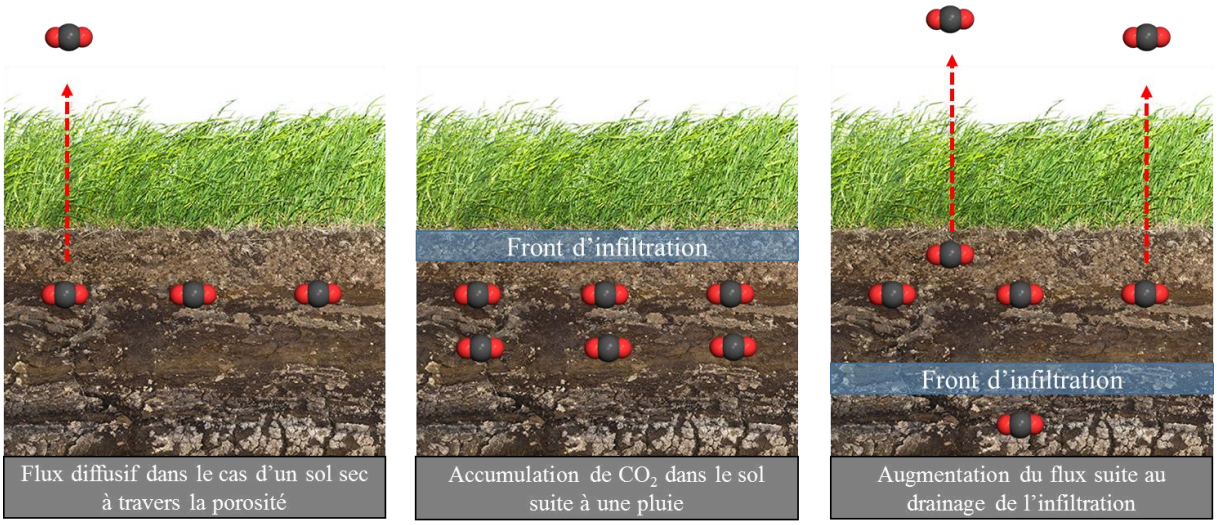


Figure III-27 : Schémas conceptuels de la dynamique du flux de CO_2 émanant du sol selon l'état hydrique de ce dernier.

La mesure du flux de CO_2 émanant des calcisols leptiques au cours des trois derniers mois de l'étude montre donc le rôle important de la teneur en eau du sol sur le transfert ascendant de CO_2. Ce mécanisme responsable de l'accumulation de CO_2 dans l'horizon productif, permet alors d'expliquer les fortes teneurs en CO_2 mesurés dans les calcisols au cours des périodes de forte teneur en eau de ce dernier.

Ce mécanisme physique s'explique par une diminution des échanges entre le massif et l'atmosphère extérieure suite à la diminution de la perméabilité au gaz des sols (modification des conditions aux limites). En effet, au cours des périodes de forte saturation en eau de ces horizons, les vides sont majoritairement occupés par l'eau, réduisant ainsi les flux advectifs et diffusifs vers l'atmosphère. Le CO_2 produit dans un même temps dans ces horizons va donc s'accumuler dans les sols et la partie superficielle de l'épikarst sous l'impact des flux descendants, entrainant ainsi une augmentation de la concentration en CO_2 de l'air. A contrario, lorsque la saturation en eau du sol diminue, les vides sont peu à peu disponibles pour les processus de transfert de gaz vers l'atmosphère. La teneur en CO_2 de l'air diminue alors peu à peu du fait des flux ascendants de CO_2 qui sont alors plus importants que la production de CO_2 dans le milieu.

La variabilité saisonnière de ce flux n'est pour le moment pas interprétable grâce aux mesures effectuées de Mai à Août 2016. En effet, il est cohérent de penser que ce flux va varier saisonnièrement sous l'influence de la température externe et de la production de CO_2 dans les calcisols. Ces mesures doivent donc être pérennisées pour permettre d'améliorer nos connaissances sur cette composante importante de la dynamique du CO_2 dans les sols et les

formations sous-jacentes de la zone vadose. En attendant, la variabilité de ce flux sera prise en compte dans nos interprétations en considérant les différentes données à notre disposition dans la littérature.

III.3.3 Interprétation de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans l'épikarst et les formations détritiques associées

Cette sous-partie a pour objectifs de présenter dans un premier temps les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans les phénomènes d'accumulation et de transfert diffusif ou advectif du CO_2 dans les calcaires épikarstiques et les altérites. Par la suite, les possibles échanges entre ces deux formations géologiques aux propriétés physico-chimiques et hydrogéologiques distinctes seront abordés. Les mécanismes mis en évidence devront alors être pris en compte pour la construction d'un modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans cette zone.

III.3.3.1 Mécanismes responsables de l'accumulation et des transferts du CO_2 dans le massif

Une des problématiques principales de cette étude sur la dynamique du CO_2 dans la zone vadose, est de comprendre comment des teneurs en CO_2 supérieures à celles retrouvées dans les sols du site pouvaient être présentes dans les eaux et dans l'air de la grotte de Lascaux. Dans ce but, les mécanismes responsables de la variation spatio-temporelle du CO_2 sont étudiés à partir des différentes séries temporelles de PCO_2 et des paramètres hydroclimatiques acquises grâce au monitoring en continu mis en place dans la parcelle expérimentale.

III.3.3.1.1 Accumulation et transfert advectif du CO_2 sous l'effet de la saturation en eau du milieu

L'évolution des teneurs en CO_2 dans les forages les moins profonds de l'épikarst (FC1 et FC2), mais aussi dans ceux des altérites (FR1 et FR2) laisse transparaitre deux mécanismes différents. Ces derniers sont toutefois de nature et d'ampleur différentes selon l'encaissant. C'est pourquoi, il est choisi dans un premier temps de focaliser l'interprétation sur la dynamique dans les calcaires dans lesquels la Grotte de Lascaux est présente.

La Figure III-28 présente l'évolution des PCO_2 dans les forages FC1 et FC2 en parallèle avec celle de la teneur en eau dans les sols ainsi que des pluies journalières.

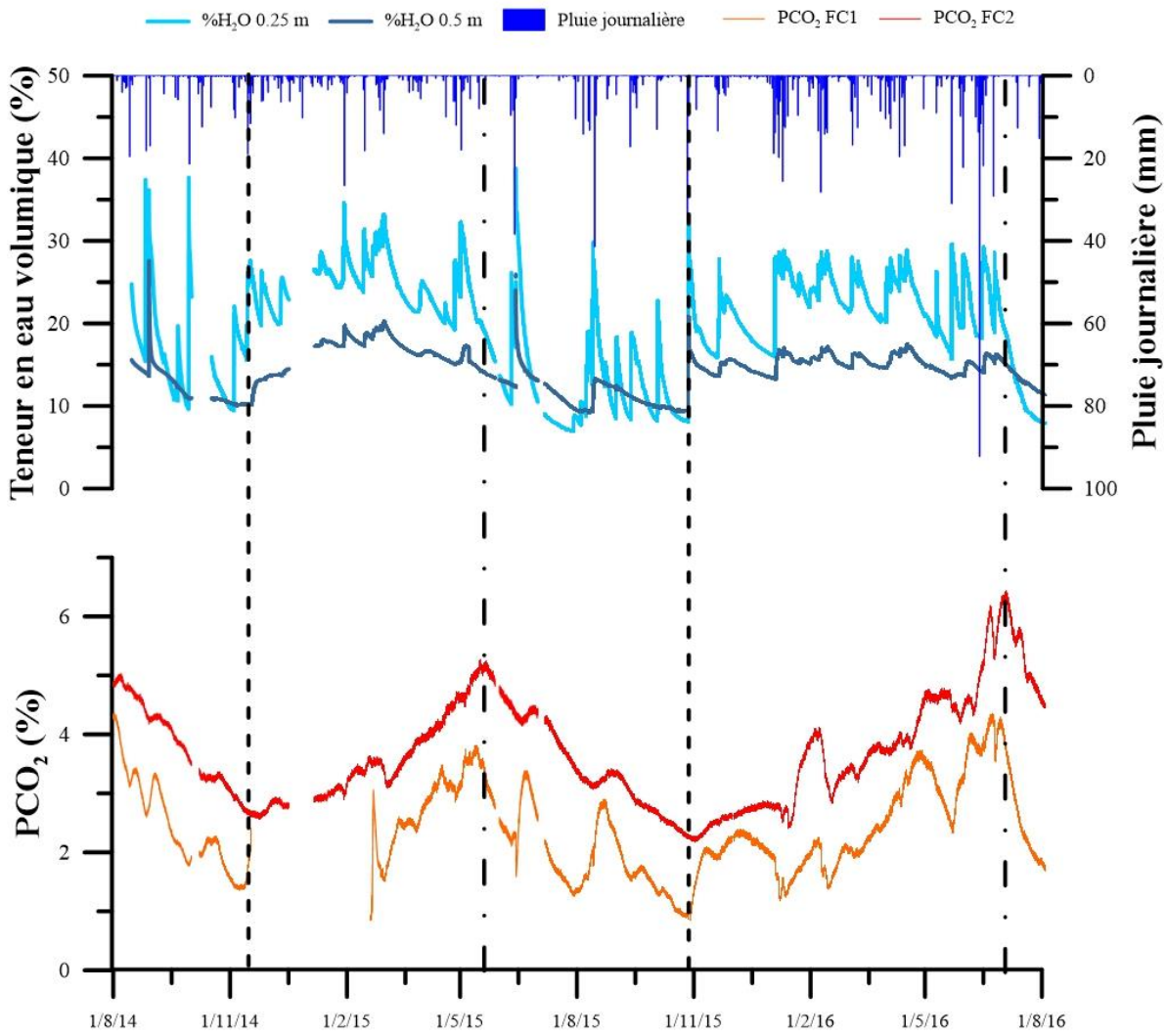


Figure III-28 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FC1 et FC2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'augmentation des PCO_2 suite à l'augmentation de la teneur en eau. Les points et tiret soulignent quant à eux le début de la décroissance des PCO_2 causée par la diminution de la teneur en eau.

Deux tendances importantes se dégagent suite à l'analyse de ces séries temporelles. La teneur en eau semble influencer les PCO_2 à 1 et 2 m de profondeur l'épikarst à l'échelle saisonnière mais aussi à l'échelle d'un épisode pluvieux.

Pour ce qui est de l'influence saisonnière, il est intéressant de remarquer que la teneur en CO_2 dans les différents forages croît fortement suite à l'établissement et au maintien d'une teneur en eau importante (proche de 100 %) dans les horizons supérieurs. Il est en fait cohérent de penser qu'une petite réserve d'eau se forme à l'interface entre les calcisols leptiques et les calcaires fracturés et délités de l'épikarst du fait du contraste de perméabilité présent à leur interface. Les PCO_2 passent alors au cours de l'année 2015 de 1% à 4 % en l'espace de 6 mois dans FC1 et de 2.5 % à 5 % dans le même laps de temps dans FC2. Les teneurs en CO_2 dans

l'épikarst superficiel augmentent donc de 200 à 400% selon la profondeur pour atteindre des valeurs maximales au cours du mois de Mai en 2015 et du mois de Juillet en 2016. A l'inverse, la diminution progressive de la saturation en eau des sols conduit à une décroissance progressive de la teneur en CO_2 dans ces deux forages qui atteint en Novembre 2015 des niveaux similaires à ceux enregistrés auparavant. Ces variations saisonnières dénotent d'un processus important dans la dynamique du CO_2 : l'accumulation de CO_2 dans l'épikarst sous l'effet de l'augmentation de la saturation en eau des sols.

Ce phénomène vient confirmer l'importance des échanges entre sols et atmosphère dans la dynamique du CO_2 et notamment dans les cycles de recharge et de vidange saisonniers du CO_2 de l'épikarst.

Parallèlement, la saturation en eau des horizons superficiels joue un rôle prépondérant dans la variabilité à l'échelle mensuelle des PCO_2 dans les forages FC1 et FC2. En effet, en plus de la variabilité saisonnière provoquée par les mécanismes de vidanges et de recharge du CO_2 du massif, l'augmentation des teneurs en eau traduisant l'occurrence de fronts d'infiltration dans le massif suite à chaque épisode pluvieux a aussi un impact bien visible sur la concentration en CO_2 dans l'épikarst superficiel. De plus, il semble que les variations des teneurs en CO_2 suites aux pluies sont différentes en période de recharge et de drainage du massif et donc selon la saturation en eau à long terme des horizons superficiels. Les teneurs en CO_2 augmentent en effet de manière plus importante lorsque la teneur en eau moyenne des horizons superficiels est faible.

La Figure III-29 présente l'évolution temporelle des teneurs en eau à 0.25 à 0.5 m de profondeur, des cumuls journaliers de précipitation et des teneurs en CO_2 dans FC1 et FC2 du 01/05/2015 au 01/10/2015. Cette période est choisie du fait de la succession d'évènements pluvieux conduisant à une augmentation conséquente de la teneur en eau. Durant ces 5 mois, la teneur en eau avant chaque épisode pluvieux est faible comparativement aux mois précédents.

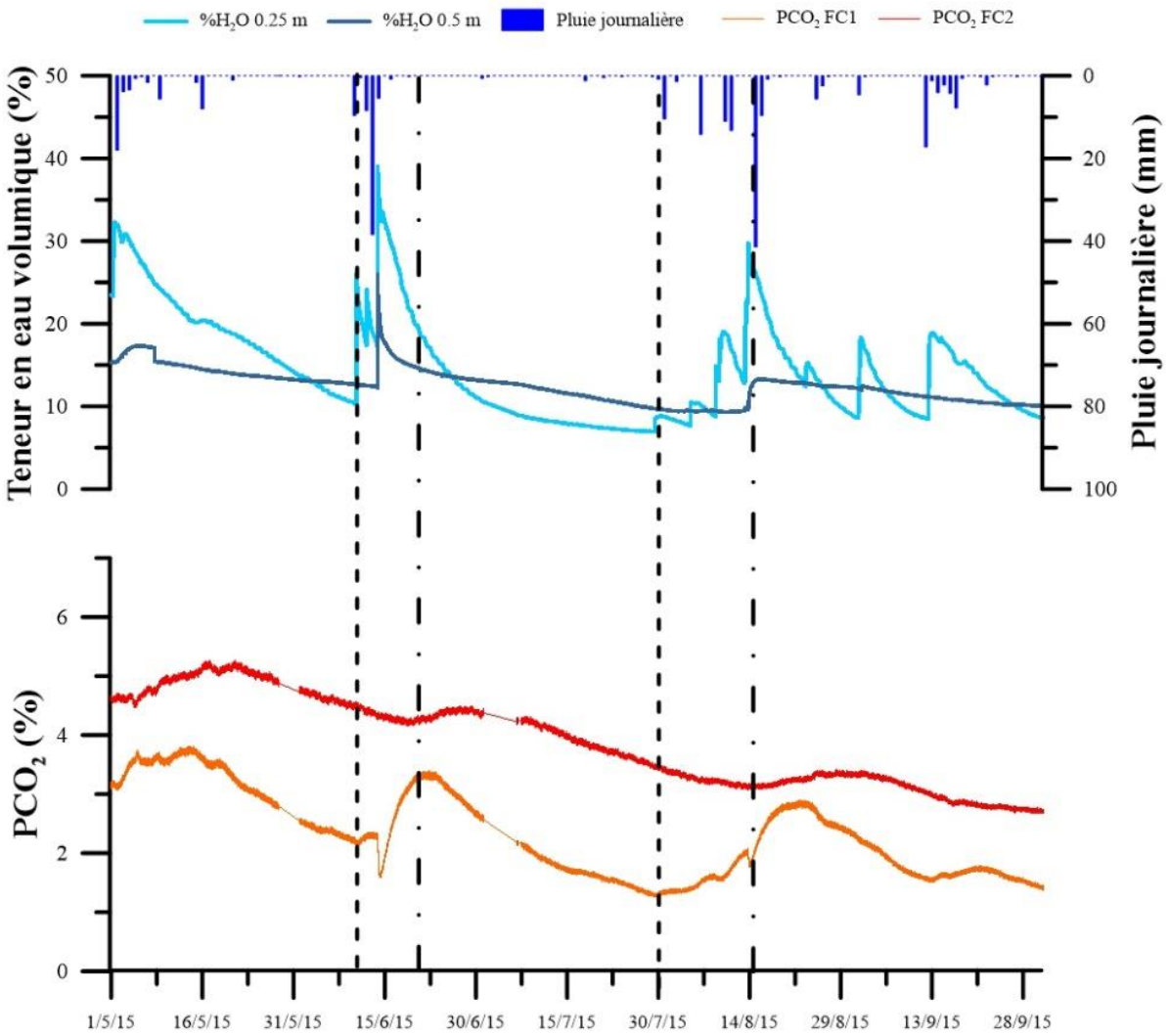


Figure III-29 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FC1 et FC2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/05/2015 au 01/10/2015. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'augmentation des PCO_2 à 1 m de profondeur quand les points et tirets soulignent l'augmentation à 2 m de profondeur suite à l'augmentation de la teneur en eau.

De manière analogue au mécanisme décrit précédemment, l'augmentation importante de la teneur en eau suite aux pluies des mois de Juin et Août 2015 produit un accroissement du CO_2 dans les deux premiers mètres de l'épikarst puis une décroissance rapide suite à l'assèchement de l'horizon superficiel. L'influence de chaque épisode est dans ces cas de l'ordre d'un mois au cours duquel l'augmentation de la concentration en CO_2 est beaucoup plus importante dans le premier mètre (1 à 2%) que plus en profondeur (0.5%).

Une différence notable est observée pour ce mécanisme qui semble se produire avec un déphasage temporel conséquent (10 jours) entre le premier et le deuxième mètre de profondeur. Cette notion de déphasage temporel, qui n'était pas mise en évidence pour les mécanismes de recharge et de vidange de l'épikarst, laisse penser qu'une composante de transfert advectif du

CO_2 sous l'effet des fronts d'infiltration rentre en jeu dans ce phénomène. La diminution de la teneur en CO_2 au début de chaque épisode, même si cette dernière est faible et limitée dans le temps, laisse en effet apparaitre un transfert par effet piston de l'air du sol (moins concentré en CO_2), vers l'épikarst superficiel au cours des premiers centimètres d'infiltration, d'où la diminution de la PCO_2 dans FC1. Il semble donc qu'en plus de limiter les flux de CO_2 ascendants vers l'atmosphère et donc de permettre l'accumulation de CO_2 dans l'épikarst superficiel, les fronts d'infiltration jouent un rôle prépondérant dans le transfert vers la profondeur du CO_2. Ce processus de transport conduit alors à l'augmentation de la concentration en CO_2 dans les forages FC1 et FC2. Lorsque que ces fronts d'infiltration ont poursuivi leur cheminement plus en profondeur, la teneur en eau des sols et du massif diminue donc peu à peu, permettant ainsi la remise en place des échanges avec l'atmosphère par diffusion et une lente remise à l'équilibre du système (15 à 20 jours).

Ces différents mécanismes mis au jour montrent donc que la saturation en eau des sols et des horizons superficiels de l'épikarst ont une influence importante à court et moyen termes sur la dynamique du CO_2 dans l'épikarst. Qu'en est-il de l'influence de la teneur en eau sur l'évolution des concentrations en CO_2 dans les forages FR1 et FR2 situés dans les altérites de la parcelle expérimentale ?

La Figure III-30 présente l'évolution des PCO_2 dans FR1 et FR2 mise en parallèle avec celle de la teneur en eau dans les sols ainsi que des pluies journalières.

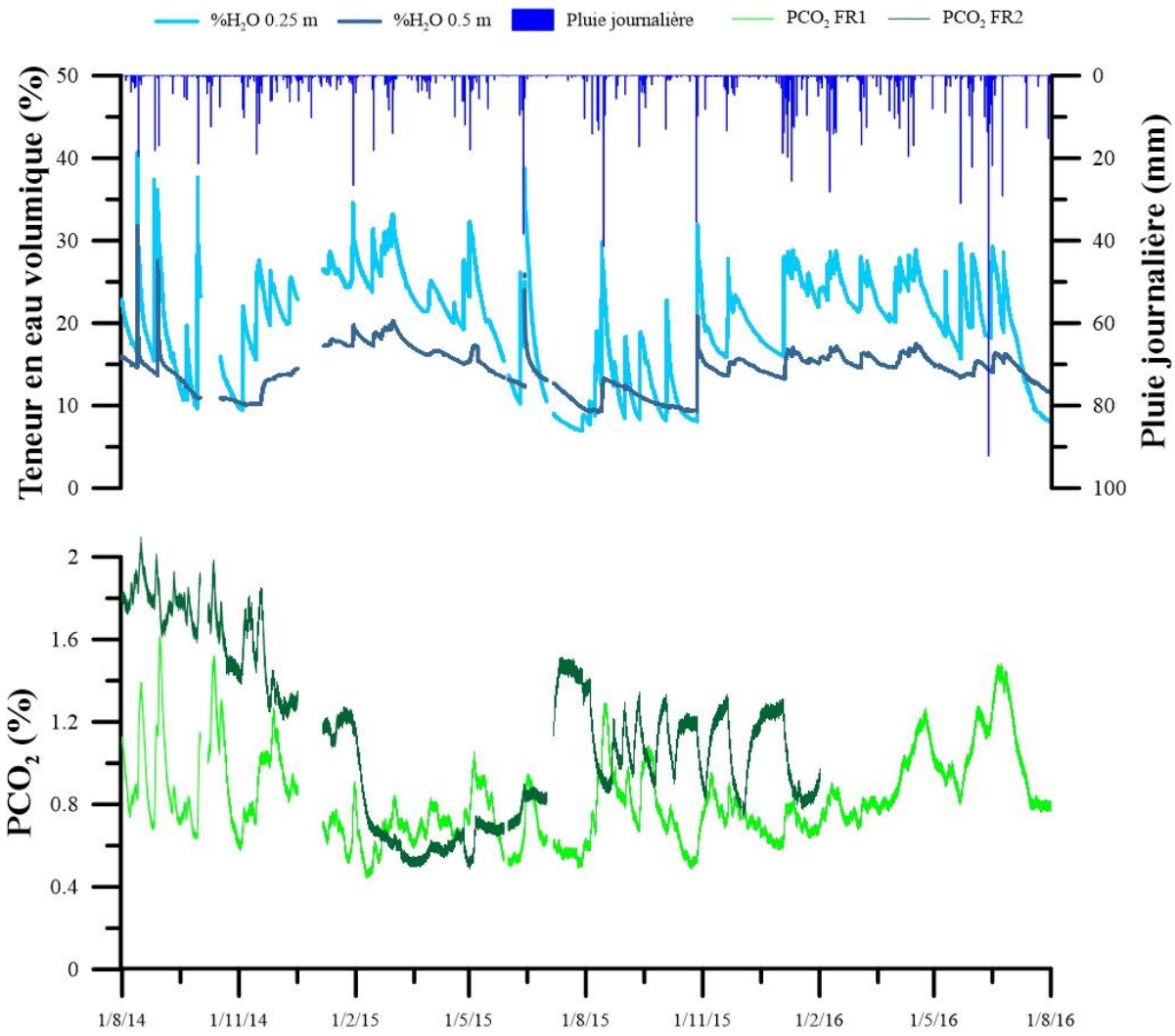


Figure III-30 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les pluies journalières sont aussi présentées.

Une première observation croisée des différents paramètres ne montre pas clairement d'influence saisonnière de la saturation en eau des altérites superficielles sur les PCO_2 mesurées dans les forages FR1 et FR2 contrairement à ce qui avait été relevé dans l'épikarst. Cette absence d'accumulation de CO_2 saisonnière dans les altérites est expliquée par les propriétés physiques de cette formation sédimentaire poreuse. Dans les deux premiers mètres de cette formation, la présence de sables à faibles proportions argileuses ne permet pas l'établissement d'une réserve en eau comme cela est le cas à l'interface entre le sol et l'épikarst. Les flux ascendants vers l'atmosphère ne sont que peu entravés dans leur progression, ne permettant pas d'accumulation importante du CO_2 dans ces horizons superficiels des altérites. De plus, la faible production de CO_2 dans les brunisols sus-jacents ne permet pas de contrer les pertes de CO_2 des altérites. Les teneurs en CO_2 sont ainsi beaucoup moins importantes que dans l'épikarst. A contrario, à l'échelle des épisodes pluvieux, l'augmentation de la saturation en eau des sols et

altérites semblent avoir des répercussions sur les teneurs en CO_2 mesurées dans les forages FR1 et FR2. Cependant, ces dernières paraissent différentes selon les périodes pour le forage FR2. En effet, d'Août 2014 à Septembre 2014, l'impact des sollicitations pluvieuses est similaire à celui observé dans l'épikarst comme le montre la Figure III-31. Toutefois, aucun déphasage temporel n'est observé selon la profondeur du fait de la forte perméabilité des altérites qui permet une infiltration rapide des eaux sur les deux premiers mètres de leur cheminement.

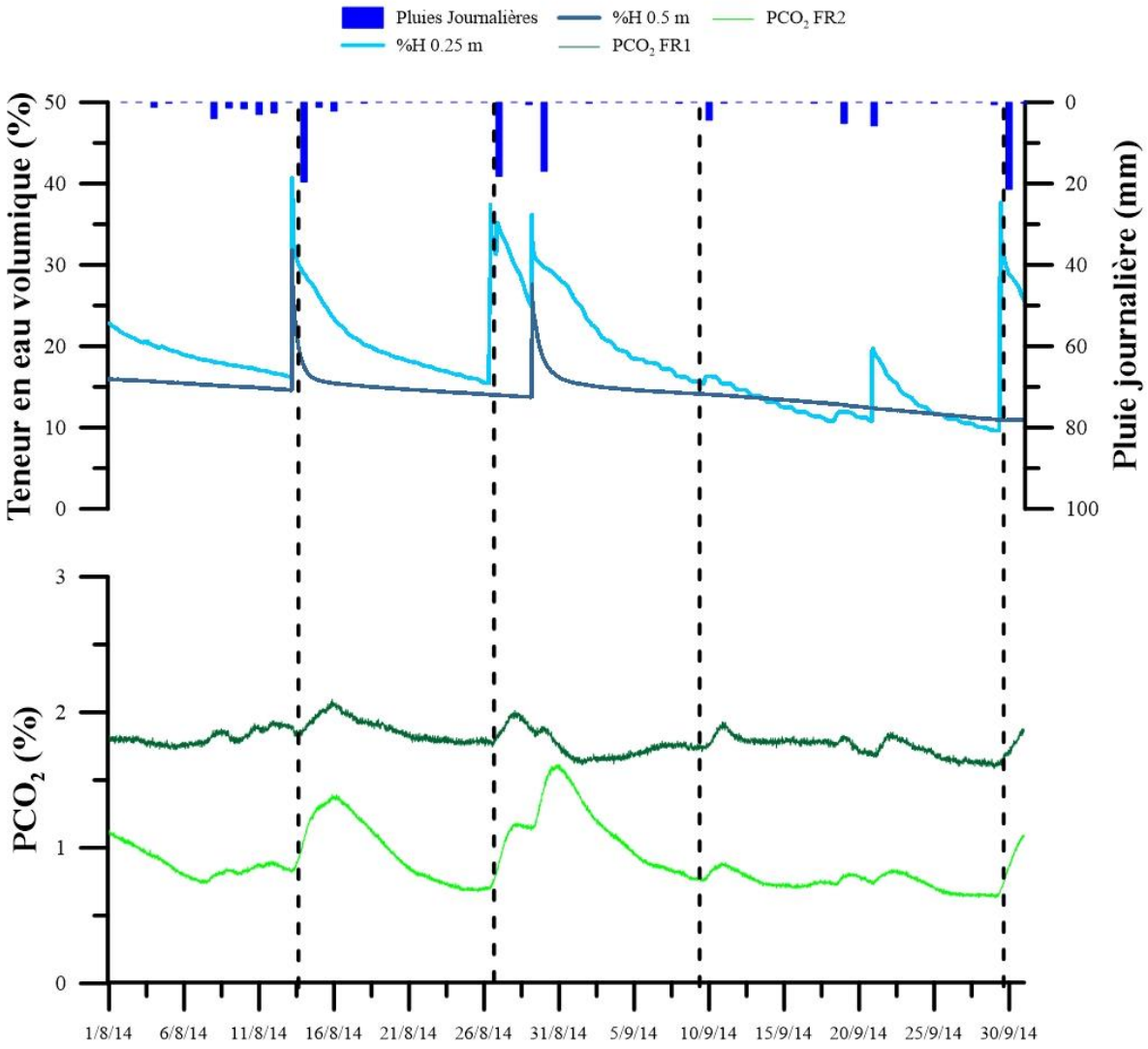


Figure III-31 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 01/08/2014 au 01/012/2014. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'accumulation du CO_2 à 1 et 2 m de profondeur corrélée à l'augmentation de la teneur en eau du sol.

A contrario, à partir du mois de Février 2015 (Figure III-30), la concentration en CO_2 baisse clairement pour atteindre 0.5 % dans le forage F2. Cette diminution importante semble

être concomitante avec la période de forte saturation en eau des altérites. L'occurrence de nombreux fronts d'infiltration durant ces mois d'hiver a pour conséquences d'homogénéiser la masse d'air dans les altérites par transfert de l'air plus superficiel vers la profondeur. Nous verrons plus avant que l'inversion du gradient thermique à ces profondeurs favorise cette homogénéisation. Les teneurs en CO_2 sont alors similaires dans FR2 et FR1.

Par la suite, ce phénomène d'homogénéisation perd en intensité suite à la diminution des sollicitations pluvieuses et du gradient thermique entre les deux points de mesure dans les forages à la fin du printemps 2015. La PCO_2 dans FR2 remonte alors pour jusqu'à 1.5 %. La réponse aux sollicitations pluvieuses est alors bien différente pour ce forage (Figure III-32). En effet, alors que le CO_2 est toujours accumulé à 1 m de profondeur lors de l'augmentation de la saturation en eau des altérites, la teneur en CO_2 à 2 m de profondeur diminue quant à elle fortement à chaque épisode d'infiltration. Les teneurs en CO_2 redeviennent alors comparables à celles enregistrées à 1 m de profondeur. Dans ce cas, l'air moins concentré en CO_2 présent en surface est poussé par effet piston suite à l'infiltration. La teneur en CO_2 diminue pendant quelques jours pour ensuite croître jusqu'à retrouver la PCO_2 initiale suite à la remise en équilibre du système par le transfert diffusif dans les altérites

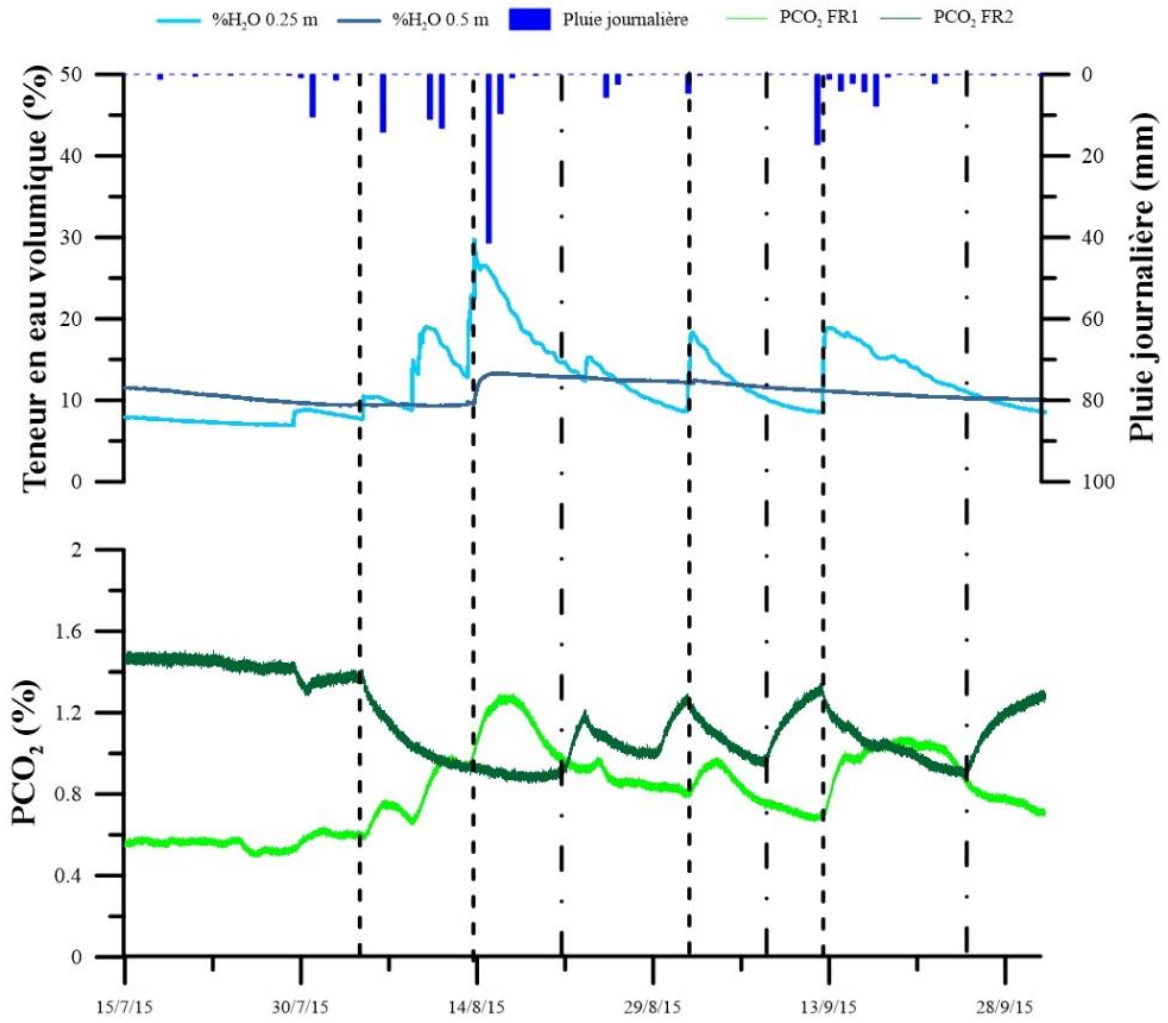


Figure III-32 : Evolution des teneurs en CO_2 dans FR1 et FR2 et des teneurs en eau du sol à 0.25 et 0.5 m de profondeur du 15/07/2015 au 01/10/2015. Les pluies journalières sont aussi présentées. Les pointillés marquent le début de l'accumulation du CO_2 à 1 m de profondeur corrélée à l'augmentation de la teneur en eau du sol. Les points et tirés soulignent l'augmentation retardée de la teneur en CO_2 à 2 m de profondeur.

En résumé, l'analyse croisée des séries temporelles de CO_2 et de teneurs en eau enregistrées dans la parcelle expérimentale a permis de pointer plusieurs mécanismes responsables en grande partie de la variabilité temporelle des concentrations en CO_2 dans l'air de l'épikarst et des altérites à faible profondeur. C'est dans l'épikarst que les effets de la saturation en eau des horizons superficiels entrainent une variabilité importante aussi bien à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle de l'épisode pluvieux. En effet, à l'échelle saisonnière, la création d'une réserve d'eau temporaire à l'interface entre les sols et les calcaires délités de l'épikarst a pour conséquence une accumulation importante du CO_2 dans les horizons sous-jacents. Cette dernière résulte alors de la diminution des échanges entre le massif et l'atmosphère lorsque la porosité du sol est saturée en eau. A l'inverse, lorsque la saturation en eau diminue suite à l'augmentation de l'activité végétative et au drainage de l'eau vers la

profondeur ou à l'évapotranspiration, les concentrations en CO_2 diminuent progressivement du fait de l'augmentation des flux de CO_2 sortant du massif par diffusion entrainant ainsi une « vidange du CO_2 » de l'épikarst superficiel. Ces processus de recharge et de vidange sont aussi mis en évidence à l'échelle de l'épisode pluvieux et sont alors accompagné d'une composante de transfert sous forme d'advection vers la profondeur suite à la progression des fronts d'infiltration.

En comparant avec les réponses des signaux de PCO_2 observées dans les altérites suite aux sollicitations pluvieuses, il est mis en évidence le rôle prépondérant des propriétés physiques ainsi que de la lithologie de la formation géologique considérée. En effet, l'absence de contraste de perméabilité dans les deux premiers mètres des altérites ne permet pas la mise en place d'une réserve d'eau temporaire perchée au cours des mois d'hiver. L'accumulation du CO_2 dans cette formation poreuse n'est alors pas observée du fait de l'importance des échanges avec l'atmosphère. Toutefois, des processus de recharge et de remise à l'équilibre du CO_2 dans les altérites sont tout de même présents à l'échelle du simple évènement pluvieux. Cependant, leurs influences sur les teneurs en CO_2 du massif semblent être conditionnées par des mécanismes annexes tels que des processus de transfert advectif résultant d'une part des fronts d'infiltration mais aussi potentiellement du gradient thermique s'établissant dans les premiers mètres des altérites.

III.3.3.1.2 Les transferts advectifs dans le massif sous l'influence des gradients de température

Comme énoncé précédemment, les mouvements d'air par advection qu'ils se tiennent entre le massif et l'atmosphère ou directement à l'intérieur du massif, ont des facteurs importants de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites étudiées. Ainsi, il semblait important de s'intéresser au processus de transport du CO_2 telle que l'advection. Ce mécanisme physique peut se mettre en place sous différentes conditions telles que la mise en place d'un gradient de température selon la profondeur ou encore les variations barométriques qui auront pour conséquences de faire varier la force s'exerçant sur la masse d'air considérée (ce processus sera discuté dans la sous-partie suivante).

Suite à la conduction thermique à travers le massif, les températures présentes à différentes profondeur vont différer selon les périodes de l'année et l'amortissement de cette onde au cours de son cheminement. La zone superficielle du massif (par convention de 0 à 10 m de profondeur) affectée par ce gradient thermique est appelée zone d'hétérothermie, ce qui

signifie que les températures dans cette zone varient selon l'influence de différents paramètres telles que la température atmosphérique ou encore les infiltrations d'eau. Plus en profondeur, les températures peu variables sont principalement influencées par le gradient thermique terrestre qui produit un réchauffement linéaire avec la profondeur dans les zones sans anomalies thermiques. Ainsi, selon la période de l'année considérée, la température sera plus chaude en profondeur qu'en surface notamment en hiver et au début du printemps et inversement. C'est dans cette configuration de réchauffement avec la profondeur que des mouvements d'air peuvent se mettre en place dans la porosité du massif, l'air plus froid présent en surface étant plus dense que l'air chaud sous-jacent. Ces mouvements d'air seront alors susceptibles d'influencer les teneurs en CO_2 de l'épikarst et des altérites dans cette zone d'hétérothermie.

La mise en place de ces processus de transport advectif intra-massif a dans un premier temps été analysée à partir des données de PCO_2 enregistrées dans l'épikarst. La Figure III-33 présente dans ce but les séries temporelles de PCO_2 acquises à 2 et 8 m de profondeur dans l'épikarst. Ces dernières sont mises en parallèle avec l'évolution temporelle des températures moyennes journalières de 0 à 10 m de profondeur estimées tous les mètres grâce au modèle de conduction thermique à une dimension (**Annexe 5**). Une interpolation spatiale des températures par la méthode IDW a ensuite été effectuée pour obtenir le graphique présenté en Figure III-33. Les périodes au cours desquelles le gradient thermique présent dans l'épikarst est propice à l'advection sont aussi présentées. Il est important de préciser que cette analyse apportera seulement une information qualitative sur la présence ou non de transport par advection à travers les fissures et fractures de l'épikarst.

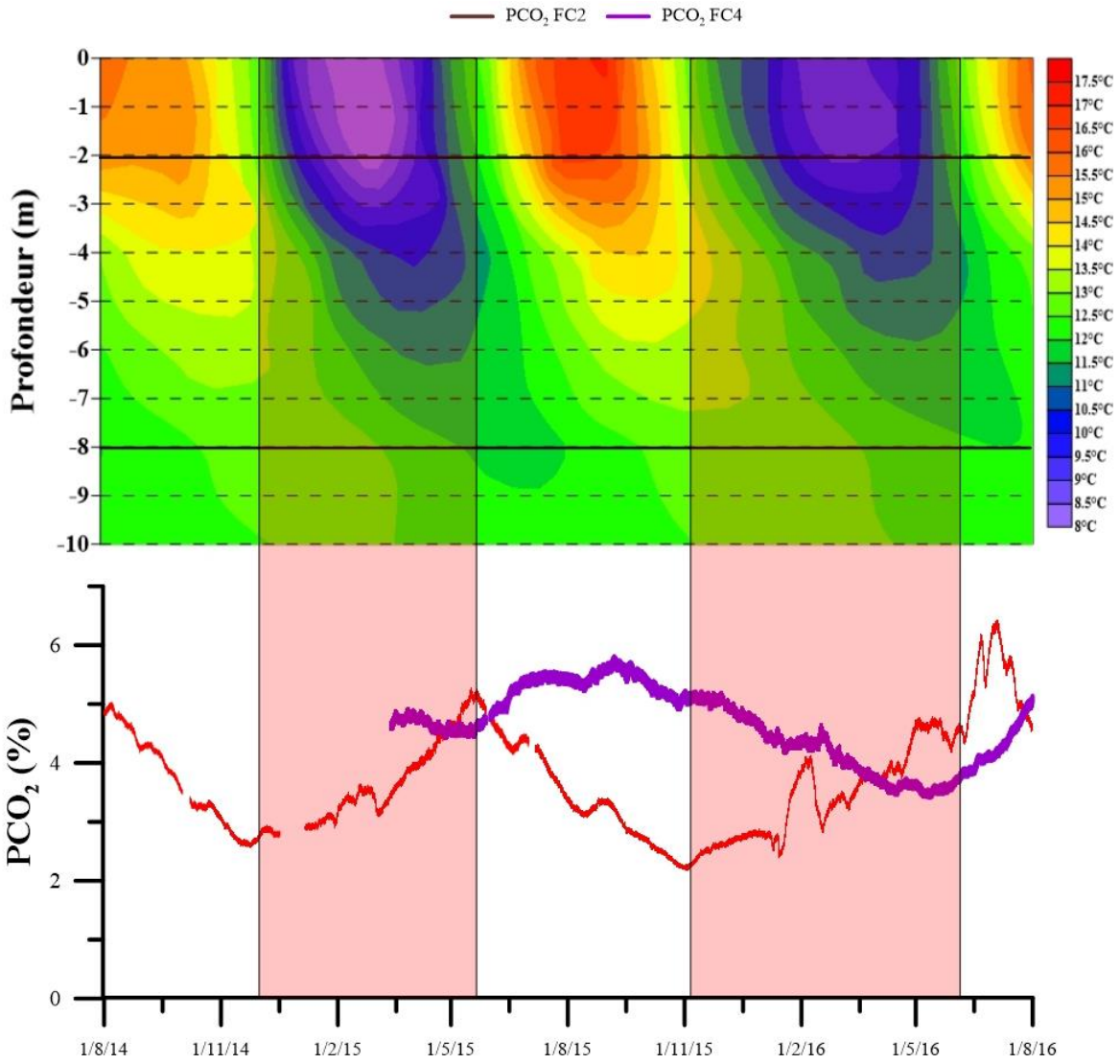


Figure III-33 : Evolution des températures simulées de 0 à 10 m de profondeur dans l'épikarst et des teneurs en CO2 dans FC2 et FC4 du 01/08/2014 au 01/08/2016. Les rectangles rosés soulignent les périodes au cours desquelles le gradient thermique permet la mise en place du transfert par advection entre les deux points de mesure.

L'analyse des différentes séries temporelles de CO_2 et de la répartition spatio-temporelle des températures dans l'épikarst apportent des informations intéressantes. En effet, il est montré que des mouvements d'air peuvent se mettre en place entre l'épikarst superficiel et sous-jacent de Janvier à Juin 2015 et de Novembre 2015 à Juillet 2016. Durant ces périodes de l'année, l'air froid présent à 2 m plus dense mais moins concentré en CO_2 est alors entrainé à travers la porosité de l'épikarst plus en profondeur. Il en résulte alors une diminution de la teneur en CO_2 dans FC4 bien visible de Novembre 2015 à Juillet 2016. L'air chaud plus concentré en CO_2 à 8 m de profondeur prend quant à lui le chemin inverse, entrainant une augmentation de la teneur en CO_2 qui vient sans aucun doute s'ajouter au mécanisme d'accumulation décrit précédemment. A contrario, lorsque le gradient thermique est négatif en fonction de la

profondeur, la teneur en CO_2 augmente lentement à 8 m de profondeur et tend à diminuer plus en surface sous l'effet conjugué de l'arrêt de l'apport en CO_2 venant de la profondeur et de l'augmentation des flux de CO_2 sortant du massif. La description de ce mécanisme complexe sous-entend donc que des molécules de CO_2 sont produites en profondeur ou qu'une zone plus profonde comporte une PCO_2 plus importantes et échanges avec cette horizon par diffusion ou aussi par advection.

Pour ce qui est des altérites, il n'a pas été possible de distinguer clairement un phénomène analogue dans cette formation poreuse qui se reproduise au cours des deux années d'étude. Cependant, ceci ne nous permet pas d'affirmer que des transports advectifs ne sont pas présents dans cette formation, mais simplement que ce phénomène est négligeable vis-à-vis des autres processus responsables de la variation spatio-temporelle des teneurs en CO_2. Une explication pourrait résider dans le fait que ces mouvements d'air peuvent se mettre en place dans les réseaux de fractures de l'épikarst et non à travers le réseau poreux des altérites. En revanche, un autre phénomène conduisant au transport par advection du CO_2 entre jeu dans cette formation sablo-argileuse particulière : « la pompe barométrique ».

III.3.3.1.3 Les transferts advectifs dans le massif sous l'influence des variations barométriques

L'effet de la pompe barométrique sur l'advection de gaz ou de liquides est bien connu dans le contexte naturel. Nous pouvons citer par exemple un effet sur la surface piézométrique d'une nappe d'eau libre, sur les échanges entre atmosphère et cavités (Lismondes, 2002) ou encore sur les signaux de CO_2 enregistrés dans le Puits du Sorcier de la grotte de Lascaux (Denis et al., 2005). Un phénomène analogue semble se reproduire sur la série temporelle de PCO_2 enregistrée dans le forage FR3 (Figure III-34).

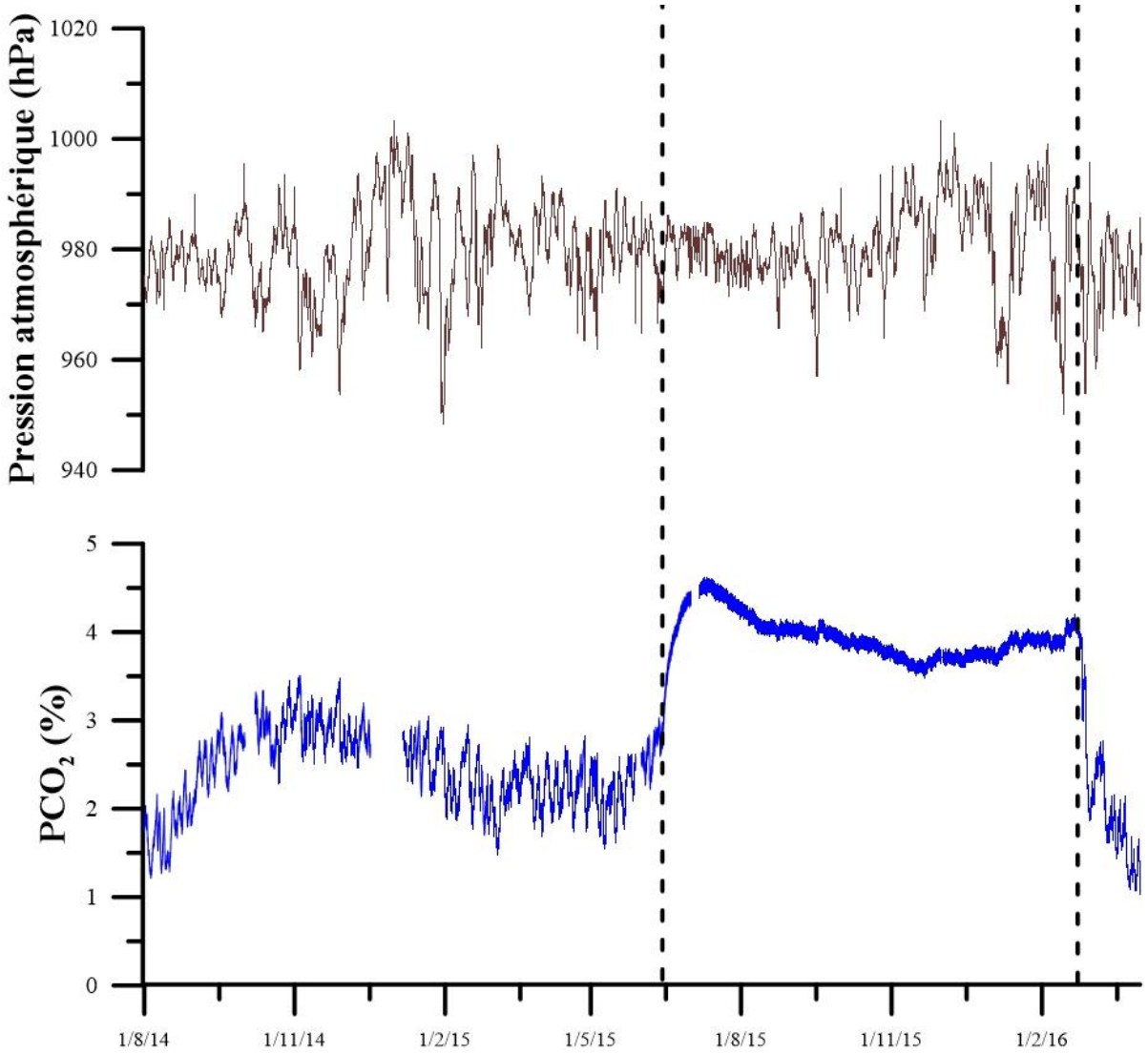


Figure III-34 : Evolution de la pression atmosphérique et de la PCO_2 dans FR3 du 01/08/2014 au 01/03/2016. Les pointillés marquent un changement important de la réponse aux variations barométriques du signal de PCO_2.

En effet, il semble à la vue de l'analyse de ces courbes, que les variations de pression aient pour conséquence une variabilité importante de la teneur en CO_2 en ce point de mesure situé à 3 m de profondeur dans une partie plus argileuse des altérites. Cependant, comme il est possible de l'observer sur cette Figure III-34, cette relation ne semble plus être effective de Juin 2015 à Février 2016. Au cours de cette période, la teneur est multipliée par deux, sa variabilité est quant à elle beaucoup moins importante. Pour vérifier ces hypothèses, deux régressions linéaires sont effectuées en Figure III-35 pour les mois d'Avril 2015 et Juin 2015.

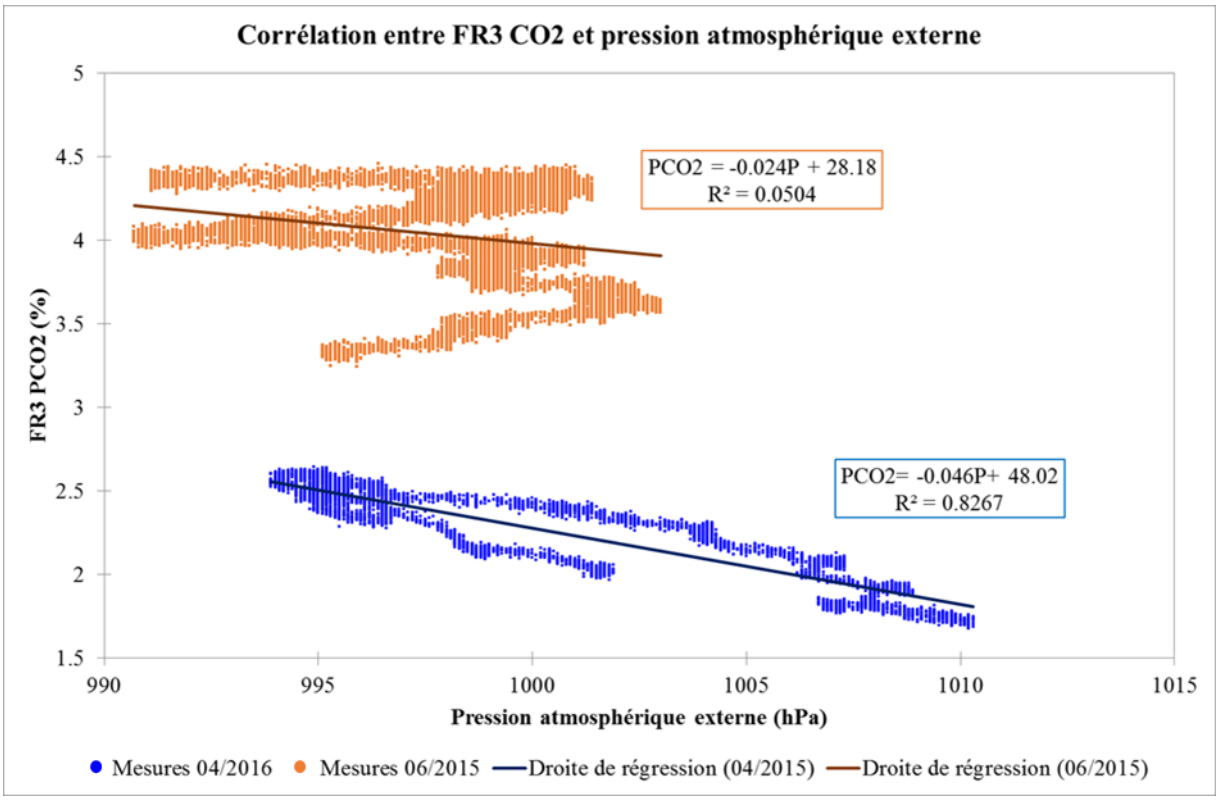


Figure III-35 : Corrélation entre la pression atmosphérique et la teneur en CO2 dans FR3. Les mesures montrent une corrélation forte pour le mois d'Avril 2015. A contrario, la PCO2 est faiblement corrélée à la pression atmosphérique pour le mois de Juin 2015.

La Figure III-35 montre une relation étroite entre les variations de la pression atmosphérique et celles de la PCO_2 dans FR3 pour le mois d'Avril 2015. Ainsi, lorsque la pression augmente, la teneur en CO_2 diminue et inversement. Comment expliquer ce phénomène et pourquoi n'est-il observé que dans ce forage ?

L'explication la plus probable est qu'une accumulation de CO_2 s'est produite en profondeur dans les altérites présentes dans les dépressions de l'épikarst. En effet, Lopez (2009) avait relevé ponctuellement des concentrations en CO_2 pouvant atteindre plus de 8 % au fond de ces dépressions. Un gradient de concentration de CO_2 semble donc s'être établi dans cette formation avec des teneurs en CO_2 de plus en plus importantes avec la profondeur. Cette masse d'air que l'on peut considérer comme stratifiée va alors subir les variations de pression atmosphérique entrainant des phases de compression et de relâchement. Ainsi, lors d'une baisse de pression, la masse d'air remonte ce qui conduit à une augmentation de la teneur en CO_2 au niveau de FR3. A contrario, au cours d'une augmentation de la pression, la masse d'air sera comprimée et la teneur en CO_2 diminuera à la profondeur du forage FR3. Le schéma explicatif présenté en Figure III-36 permet de décrire ce phénomène.

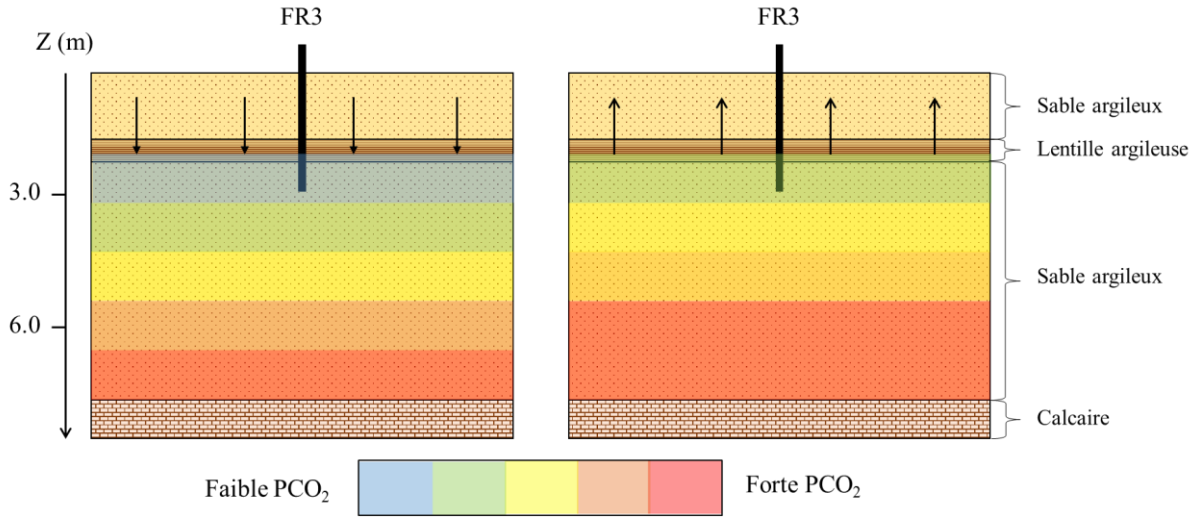


Figure III-36 : Représentations schématiques des phases de décompression (gauche) et compression (droite) de la masse d'air présente sous la lentille argileuse dans les altérites. Les flèches noires représentent le mouvement de la « nappe de CO_2 ».

Le fait que ce mécanisme ne soit pas retrouvé dans les forages plus superficiels présents dans les altérites repose sur la présence d'une lentille argileuse entre 2.20 et 2.60 m de profondeur retrouvée au cours de la foration. Cette passée argileuse dans les altérites est reconnue comme discontinue sur le site. Cependant, sa présence dans la zone de mesure limite les échanges entre les parties sus et sous-jacentes conduisant ainsi à des réponses différentes aux variations barométriques des PCO_2 mesurées dans les trois forages de la parcelle expérimentale. L'observation de cette couche moins perméable au gaz du fait de sa perméabilité moins importante permet aussi d'expliquer l'accumulation du CO_2 dans les zones profondes des dépressions de l'épikarst.

La mise en évidence de ce phénomène montre encore une fois l'importance des propriétés texturales de l'encaissant sur la dynamique du CO_2 dans les différentes formations géologiques superficielles.

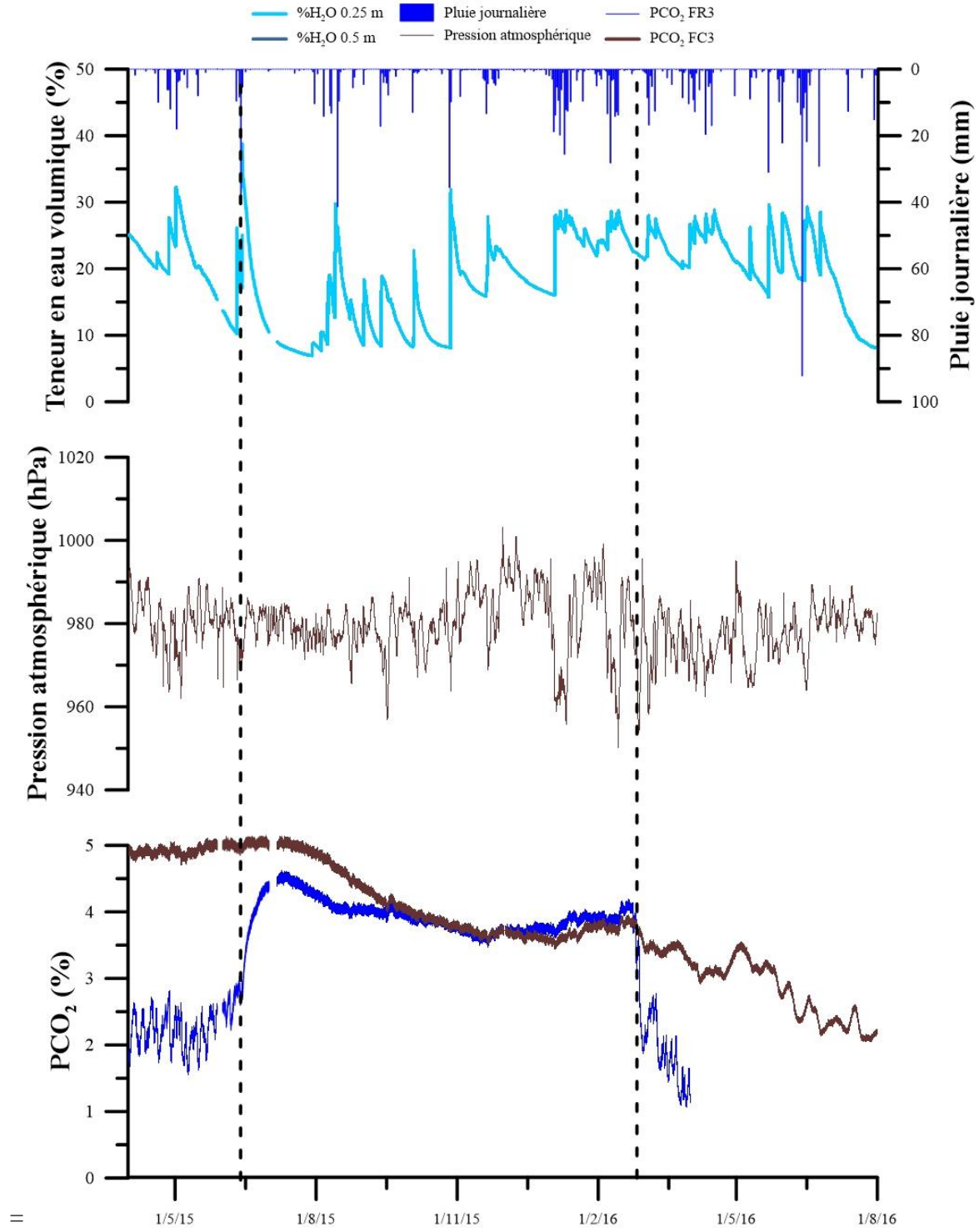
Une question importante reste tout de même en suspens, quel phénomène est à l'origine du changement de comportement vis-à-vis de la pression atmosphérique ainsi que de l'augmentation importante de la PCO_2 mesurée dans FR3 à partir du mois de Juin 2015 ?

III.3.3.2 Echanges horizontaux entre altérites et épikarst

Pour le moment, la variabilité spatio-temporelle des teneurs en CO_2 mesurées dans les forages de la parcelle expérimentale a été analysée en considérant des dynamiques indépendantes pour les altérites et l'épikarst. En effet, autant les teneurs en CO_2 que leurs

réponses aux variations des paramètres hydroclimatiques sont très différentes selon l'encaissant du fait des propriétés physiques de ces deux formations mais aussi de la différence de production de CO_2 dans les sols sus-jacents.

Cependant, l'analyse de la variabilité de la teneur en CO_2 dans FR3 couplée à celle de FC3 laisse transparaitre une évolution similaire de Juin 2015 à Février 2016 (Figure III-37).



=

Figure III-37 : Evolution des PCO_2 dans FR3 et FC3 mise en parallèle avec la pression atmosphérique, la teneur en eau du sol et les cumuls de pluie journaliers.

En effet, à partir du mois de Juin 2015, la teneur en CO_2 dans FR3 augmente fortement pour atteindre finalement les mêmes valeurs que celles mesurées à la même profondeur dans l'épikarst. Les teneurs en CO_2 restent alors similaires durant les 8 mois suivants. Cette similarité ne peut avoir qu'une seule explication, des échanges s'opèrent entre ces deux points de mesure.

Juste avant la mise en place de ces échanges, la saturation des sols et du massif est minimale comme le montre la Figure III-37. L'occurrence d'un épisode pluvieux de forte intensité conduit alors à une augmentation importante de la teneur en eau. Il semblerait donc que le front d'infiltration ait provoqué l'occurrence d'un flux advectif par effet piston de l'épikarst vers les altérites à travers le réseau de fracture. Cette relation ne peut être effective que lorsque le massif est faiblement saturé en eau, la porosité de fracture est alors disponible pour le transfert de gaz. La dynamique impactant les concentrations en CO_2 dans ces forages est alors la même justifiant ainsi la notion d'échanges entre ces deux points. Néanmoins, cette relation est subitement interrompue au cours du mois de Février 2016. La pression atmosphérique reprend alors une influence importante sur la variabilité de la PCO_2 mesurées dans FR3 jusqu'à la panne du capteur. Dans un même temps, la teneur en CO_2 diminue jusqu'à la fin de l'enregistrement dans le forage FC3. A l'heure actuelle, aucune explication n'est clairement donnée à ce phénomène, toutefois, il parait cohérent de penser que les deux points de mesure sont à nouveau isolés du fait de l'augmentation de la saturation eau du massif. Cependant, la variabilité de la PCO_2 dans FC3 n'est en rien comparable avec celle mise en lumière au cours de la première année d'enregistrement. En effet, la diminution continue de la concentration en CO_2 à cette profondeur laisse apparaitre un isolement de ce point de mesure vis-à-vis des autres forages réalisés dans l'épikarst. Cet isolement pourrait être expliqué par la forte pluviométrie du début d'année 2016 qui aurait pour conséquences une forte saturation en eau du massif. Cette dernière serait alors à l'origine de l'arrêt des communications de cette zone avec les horizons superficiels producteurs de CO_2. Cependant, il est aussi possible que cette diminution soit provoquée par des pertes en direction des altérites moins concentrées en CO_2.

III.3.4 Modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites du site de la grotte de Lascaux

La démonstration de mécanismes locaux et complexes montre combien il est difficile de généraliser à tout le site d'étude certaines observations réalisées dans la parcelle

expérimentale, tant la complexité de l'épikarst et des altérites conduit à des effets de site. La variabilité interannuelle des conditions climatiques ajoute encore un niveau de complexité supplémentaire dans l'interprétation de la dynamique du CO_2.

Néanmoins, plusieurs mécanismes généraux démontrés au travers de cette étude peuvent sans aucune difficulté être étendu à tout l'épikarst du site de la cavité de Lascaux mais aussi à d'autres sites d'étude. La compréhension de ces phénomènes physiques permet de construire un modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose superficiel. Pour finir, les perspectives à donner à cette étude seront détaillées.

III.3.4.1 Une dynamique fortement influencée par les variations hydroclimatiques et le faciès pédo-géologique

Les différentes séries temporelles de CO_2 ont montré dans un premier temps un enrichissement avec la profondeur aussi bien dans l'épikarst que dans les altérites mais aussi une différence de concentration importante entre ces deux formations. En effet, pour une même profondeur, les teneurs en CO_2 sont une fois et demie à trois fois supérieures dans l'épikarst. Néanmoins, quelles que soient la profondeur d'investigation et la formation encaissante, les signaux de PCO_2 sont très variables retranscrivant ainsi une dynamique complexe.

Dans le contexte d'un épikarst sous couvert pédologique développé associé à des altérites résultantes de processus de cryptokarstification et de fantômisation, cette dynamique du CO_2 est principalement influencée par trois mécanismes importants que sont la production de CO_2 dans les horizons superficiels, les échanges entre le massif et l'atmosphère ainsi que les mouvements d'air à l'intérieur même du réseau de fracturation de l'épikarst responsables du transfert descendant du CO_2 vers la profondeur et notamment la grotte de Lascaux. En effet, comme nous l'avons démontré, la production de CO_2 dans les sols est très contrastée sur le site d'étude (2 à 3 fois supérieure dans les calcisols par rapport aux brunisols). Cette dernière résulte clairement du faciès pédologique rencontré et notamment des paramètres physico-chimiques de ce dernier tels que le pH qui influence fortement l'établissement d'une activité microbienne intense et d'un couvert végétal sain. Une bonne connaissance de la diversité pédologique du site d'étude est donc une étape préalable pour la compréhension de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans les horizons sous-jacents. Cependant, comme évoqué précédemment, les concentrations mesurées dans les différents sols du site d'étude sont bien inférieures à celles enregistrées dans les forages mis en place dans la parcelle expérimentale ou encore dans

certaines zones de la cavité (plus de 5 % dans le Puits du Sorcier). La démonstration de l'occurence d'un processus d'accumulation du CO_2 liée à la saturation en eau des horizons superficiels est cependant venue apporter une réponse à ce verrou. Ainsi, durant les périodes pluvieuses (hiver et printemps), l'augmentation de la teneur en eau dans les sols et la potentielle formation d'une nappe temporaire à l'interface avec l'épikarst sous-jacent conduit à une augmentation de la teneur en CO_2 liée à la production dans les sols et au transfert vers les deux premiers mètres de l'épikarst. En effet, les flux de CO_2 sortant du massif sont fortement diminués du fait de la saturation de la porosité en eau. A contrario, lors de l'assèchement des horizons superficiels sous l'effet de l'évapotranspiration, les flux de CO_2 sortant vers l'atmosphère s'accroissent progressivement et conduisent à une diminution progressive de la teneur en CO_2. Ces mécanismes de recharge (accumulation) et de vidange (émission vers l'atmosphère) influencent ainsi fortement la variabilité du CO_2 dans l'épikarst et permettent d'expliquer les teneurs en CO_2 pouvant atteindre près de 7 % dans l'épikarst. La prédominance moins importante de ces phénomènes dans les altérites vient pointer l'influence des propriétés physiques telle que la perméabilité au gaz des matériaux sur ces derniers.

Parallèlement, il a été démontré que la variabilité du CO_2 en profondeur est majoritairement expliquée par les processus de transfert du CO_2 entre les différentes profondeurs de l'épikarst. Ainsi des transferts descendants par advection produit par les fronts d'infiltration ont été clairement mis en évidence dans l'épikarst et les altérites. Différemment, les transferts advectifs entre l'épikarst profond et superficiel ont été montrés. Ces derniers sont principalement conditionnés par le gradient de température s'établissant avec la profondeur sous l'effet de la conduction de l'onde thermique à travers le massif calcaire. Des échanges s'établissent alors à travers le réseau de fractures durant l'hiver et le printemps entre l'air froid présent à la surface et l'air chaud présent en profondeur. Ces derniers expliquent ainsi en grande partie la variabilité des PCO_2 relevées en profondeur dans l'épikarst. Ce mécanisme est toutefois moins influant dans les altérites du fait de leur plus faible porosité qui ne permet pas l'établissement d'écoulements d'air rapides qui puissent perdurer au cours du temps. A l'inverse, les transferts advectifs sous l'influence des variations barométriques sont enregistrés seulement dans la zone semi-confinée des altérites présente sous une lentille argileuse. Cette dernière semble en effet influencer de façon négative les échanges avec les horizons superficiels.

La compréhension de ces phénomènes de nature diverses nous permet *in-fine* de construire un modèle conceptuel de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose superficielle étudiée (Figure III-38 et Figure III-39). Ce modèle bien que réalisé à partir de données exclusivement collectées sur le site de la grotte de Lascaux, se veut général et applicable aux contextes analogues d'épikarst sous couvert pédologique.

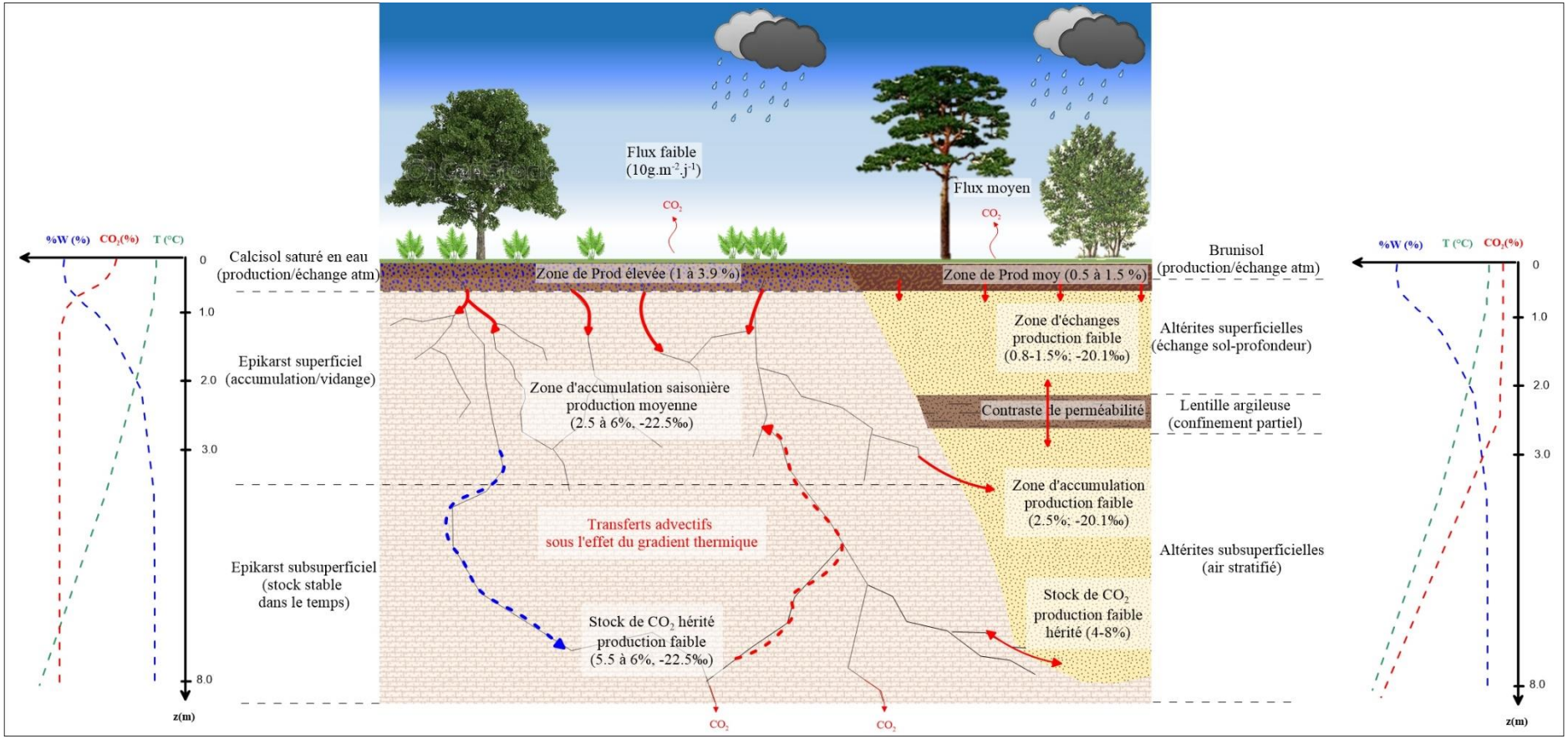


Figure III-38 : Schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites associées au cours de la période de recharge (accumulation) au printemps. Les zones de production (sol), d'accumulation (épikarst superficiel) et de stock (épikarst subsuperficiel) sont représentées pour l'épikarst. Une zone d'échange est présente dans les altérites superficielles.

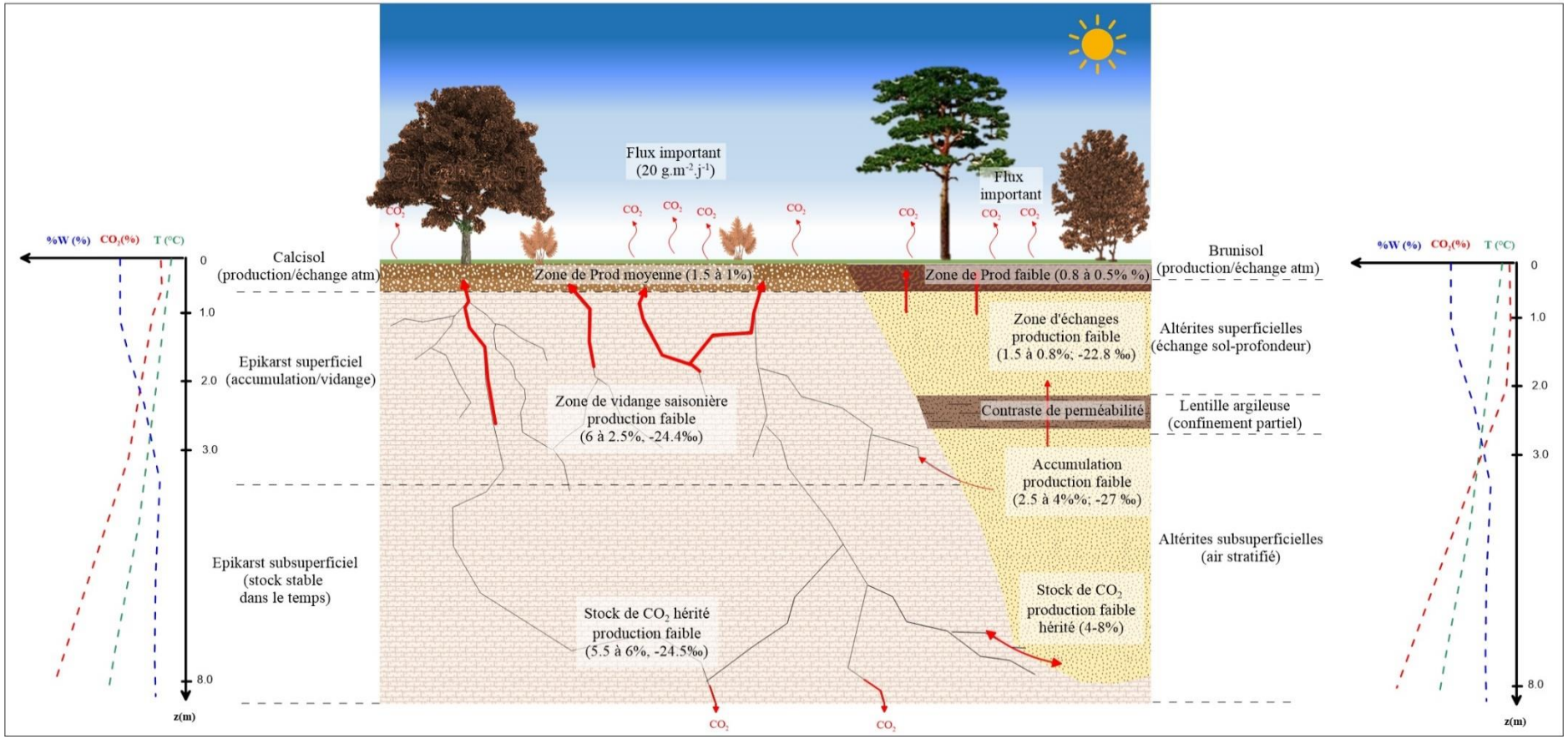


Figure III-39 : Schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et les altérites associées au cours de la période de vidange (émission vers l'atmosphère) de l'été à la fin de l'hiver. Les zones de production (sol), de vidange (épikarst superficiel) et de stock (épikarst subsuperficiel) sont représentées pour l'épikarst. Une zone d'échange est présente dans les altérites superficielles.

III.3.4.2 Perspectives d'étude

Plusieurs phénomènes physiques responsables de la dynamique du CO_2 dans la zone vadose superficielle de la colline de Lascaux ont été identifiés. Cependant, plusieurs questions restent en suspens et notamment celles relatives au signal isotopique du CO_2. En effet, le nombre de prélèvements réalisés au cours de cette étude n'ont pas permis de comprendre les facteurs responsables de la variabilité de ce signal. Il serait donc intéressant d'effectuer des prélèvements plus nombreux ou encore de mesurer en continu ce signal isotopique *in-situ* afin de mieux appréhender les processus de transfert dans l'épikarst ainsi que vers le massif sous-jacent.

Enfin, l'influence de tous ces mécanismes sur la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la zone vadose superficielle pointe la nécessité de considérer l'impact important des conditions climatiques et notamment le rôle prédominant de la pluviosité. Dans un contexte de changement climatique, il semble donc important de pérenniser ce suivi et de l'étendre à d'autres sites d'étude locaux ou régionaux. En effet, il est tout à fait cohérent de penser qu'une diminution progressive de la pluviométrie pourrait augmenter les flux de CO_2 émanant des zones karstiques. Ainsi, outre les considérations relatives aux émissions de gaz à effet de serre, la diminution de la teneur en CO_2 dans le système karstique pourrait provoquer des modifications importantes du signal hydrogéochimique des eaux qui s'infiltrent dans la zone vadose pour atteindre des cavités de subsurface telle que la grotte de Lascaux ou encore qui rejoignent les aquifères karstiques exploités pour leur ressource en eau.

IV. Dynamique du CO_2 dans la grotte de Lascaux

De nombreuses études relatives au CO_2 dans les cavités karstiques ont été conduites depuis le milieu du XX^{ème} siècle avec des objectifs divers. Les premières d'entre elles avaient pour objectif de déterminer l'impact du CO_2 du milieu souterrain sur la santé humaine. Plus récemment, de nombreux travaux ont été effectués dans une optique de compréhension du cycle du carbone dans le système karstique et notamment des flux de CO_2 émanant des cavités de la zone vadose (Peyraube et al. 2016) et de leur influence potentielle sur le réchauffement climatique (Madonia et al., 2012).

Il est aussi possible de citer l'intérêt de l'étude du CO_2 dans les cavités karstiques pour la compréhension de l'équilibre des eaux aux parois ornées mais aussi sur les spéléothèmes. En effet, le dioxyde de carbone (CO_2) est fortement impliqué dans les phénomènes affectant la calcite dans les cavités karstiques (White, 1988). Ce gaz augmente le pouvoir corrosif des eaux de condensation et potentiellement des eaux d'exfiltration. A contrario, les variations de la pression partielle de CO_2 dans les cavités peuvent augmenter les phénomènes de précipitation de calcite par les eaux d'exfiltration qui se sont chargées en CO_2 dissous lors de leur parcours dans le sol et l'épikarst sus-jacents. La PCO_2 de l'air des cavités est donc un paramètre important pour l'étude des spéléothèmes (Spötl et al., 2005; Sholz et al., 2009; Dreybrodt and Sholz 2011), mais aussi pour la conservation des cavités ornées (Fernandez et al., 1986 ; Cigna, 2002). C'est dans ce cadre que l'impact du CO_2 sur les visiteurs mais aussi sur la cavité a été largement étudié (Dragovich & Grose, 1990; Craven, 1996; Hoyos et al., 1998; De Freitas and Banbury, 1999, Sanchez-Moral et al., 1999 ; Liang et al., 2000; Carrasco et al., 2002; Zelinka, 2002 ; Fernandez-Cortes et al., 2009).

Ces problématiques sont d'autant plus importantes quand on se place dans un contexte de cavité ornée comme l'est celle de Lascaux. La compréhension des mécanismes responsables de l'équilibre dynamique de la grotte est complexe. Cette grotte est dans une situation naturelle évolutive ; le suivi de cette évolution ayant mis en évidence dès 1963 que six mois par an, l'air souterrain peut condenser sur les parois ornées. Ces mécanismes sont déclenchés par la modification des températures en surface de la roche comme dans l'air souterrain et peuvent provoquer des phases de condensation pouvant conduire à la corrosion des supports calciques du fait de la présence de gaz carbonique. En parallèle, des eaux d'exfiltration présentes aux joints stratigraphiques sur certaines parois de la cavité sont susceptibles de précipiter du carbonate de calcium sur les ornements selon les conditions d'équilibre thermodynamique de la cavité (température, CO_2, *etc.*) ainsi que le signal géochimique de ces eaux.

Cette complexité est accrue par le fait que cette cavité de petite taille localisée dans la partie superficielle de la zone vadose, revêt un caractère particulier résultant de son intérêt archéologique. En effet, depuis sa découverte, la cavité de Lascaux a été profondément remaniée pour améliorer son accessibilité aux visiteurs puis pour assurer sa conservation. Ainsi, des aménagements conséquents ont été effectués tels que la mise en place de deux SAS à l'entrée de la cavité pour limiter les échanges entre cavité et atmosphère et retranscrire les conditions microclimatiques régissant l'aérologie de la cavité avant sa découverte. De même, un dispositif d'extracteur d'air a été mis en place avec comme objectif d'abaisser la concentration en CO_2 de la cavité. Cependant, la question de l'impact de cet extracteur d'air pour la conservation des parois ornées se pose. C'est pourquoi, en plus de déterminer la dynamique du CO_2 dans la cavité, il est aussi entrepris d'apporter des éléments de réponses relatifs aux impacts potentiels de l'extracteur d'air sur les parois et plus globalement sur l'aérologie de la cavité.

Pour réaliser ces objectifs, les analyses et interprétations se baseront sur les nombreuses séries temporelles des paramètres microclimatiques et de teneurs en CO_2 de l'atmosphère de la cavité. En effet, suite aux différentes perturbations de l'environnement souterrain de la cavité, un important système de suivi en continu des paramètres tels que le CO_2 et les températures (air et roche) a été mis en place. Ce dernier permet de réaliser une surveillance détaillée des différents phénomènes pouvant affecter les parois ornées tels que la condensation ou l'assèchement des parois, mais aussi l'évolution des teneurs en CO_2 dans chaque partie de la cavité. Notre analyse s'appuiera donc sur les données acquises depuis l'année 2012. L'arrêt de l'extracteur d'air en Janvier 2015 permet de disposer d'une année et demie de données microclimatiques et de PCO_2 pour comprendre l'impact du pompage de l'air sur la cavité. En parallèle, le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C$-CO_2) et sa variabilité spatio-temporelle sont analysées grâce à cinq campagnes de prélèvements réparties sur les trois années d'étude. Ces données doivent permettre de mieux apprécier les échanges entre la cavité, le massif et l'atmosphère extérieure en contexte d'extraction de l'air ainsi qu'en contexte « naturel » suite à l'arrêt du pompage. Ces nouvelles informations nous permettront d'évaluer l'impact des eaux aux parois de la cavité en contexte « naturel » et d'extraction de l'air dans les chapitres suivants de ce manuscrit.

Ce chapitre présente donc les principaux résultats obtenus sur ces problématiques au cours des trois années de thèse. Pour cela, dans un premier temps, un état des connaissances

relatives à l'étude de la dynamique du CO_2 dans les cavités karstiques est effectué. La partie suivante est consacrée à la description des moyens mis en œuvre au cours de cette étude. Elle est suivie par l'étude de la dynamique du CO_2 en contexte « naturel ». Enfin, l'étude comparative avec la dynamique du CO_2 et l'aérologie de la cavité en contexte de pompage est présentée.

IV.1 Prérequis pour l'analyse de la dynamique du CO_2 et de l'aérologie des cavités karstiques

Cette première partie a pour objectif de présenter les divers mécanismes affectant la dynamique du CO_2 dans les cavités karstique. Pour cela, un état des connaissances actuelles relatives à cette problématique est effectué. Par la suite, une étude bibliographique sur l'apport des mesures de la composition isotopique du CO_2 de l'air des cavités karstiques est réalisée. Enfin, les prérequis relatifs à l'étude de l'aérologie des cavités karstiques sont présentés. Ces derniers permettront de justifier la stratégie de l'étude conduite pendant ces trois années de thèse ainsi que les interprétations qui en découlent.

IV.1.1 La dynamique du CO_2 dans les cavités karstiques

IV.1.1.1 Origine du CO_2 dans les cavités karstiques

Le CO_2 rencontré dans les cavités peut provenir de quatre sources différentes (Lismondes, 2002) :

- Le CO_2 d'origine atmosphérique qui peut être introduit dans les cavités suite aux échanges entre ces dernières et l'atmosphère,
- Le CO_2 d'origine profonde provenant d'hypothétiques exhalaisons volcaniques à travers les réseaux de fractures (Wood & Petraitis, 1984). Cette origine est peu probable dans notre cas d'étude en contexte du Bassin Sédimentaire Aquitain,
- Le CO_2 produit dans les cavités karstiques par l'oxydation de matières organiques réalisée par les micro-organismes,
- Le CO_2 produit au niveau des sols par les respirations autotrophe et hétérotrophe.

La quatrième source de CO_2 est considérée généralement comme majoritaire dans les cavités de subsurface comme celle de Lascaux. Le CO_2 retrouvé dans l'atmosphère de ces cavités est produit dans les horizons de subsurface par la dégradation de la matière organique et la respiration racinaire (Kuzyakov, 2006). Ce gaz va s'accumuler dans les pores et fissures de la zone vadose. Benavente et al. (2010) ont ainsi mesuré des PCO_2 supérieures à 6% dans la zone vadose de la grotte de Nerja (Espagne). Ce gaz est entrainé dans les cavités par transferts sous forme gazeuse ou dissoute (Ek et Gewelt, 1985 ; Kaufmann and Dreybrodt, 2007). L'atmosphère de certaines cavités présente donc des PCO_2 importantes: 3.4% dans la cavité de Chauvet (Mangin et al., 1999), 2.0% à Aven d'Orgnac (Bourges et al., 2006), 6.0% dans la

grotte des Grandes Combes (Batiot-Guilhe et al., 2007), ou encore plus de 5.0% dans la grotte de Lascaux (Denis et al., 2005).

IV.1.1.2 Mécanismes responsables de la dynamique du CO_2 dans les cavités karstiques

La teneur en CO_2 présente dans les cavités est la résultante de plusieurs composantes :

- Les flux de CO_2 entrant dans la cavité depuis les sols et l'épikarst,
- Les flux de CO_2 anthropiques dans le cas des cavités visités,
- Les flux de CO_2 sortant de la cavité sous l'impact des échanges avec l'atmosphère extérieure,
- Les mécanismes aérologiques intra-cavitaires.

La répartition spatio-temporelle du CO_2 dans les cavités karstiques a aussi fait l'objet d'études par le passé (Atkinson, 1977; Wood and Petraitis, 1984; Ek and Gewelt, 1985 ; Wood, 1985 ; Bourges et al, 2001; Batiot, 2002). Plus récemment, Baldini et al. (2006a), Milanolo et al. (2009) ou encore Fernandez-Cortes et al. (2015) ont présenté des cartes haute résolution de la répartition du CO_2 pour identifier les sources et puits de CO_2 dans les cavités karstiques. Cependant, aucune de ces études ne se basent sur un monitoring in-situ haute résolution et haute fréquence tel que celui exploité sur le site de la cavité de Lascaux. Ainsi, ces dernières ne sont pas à même de déterminer précisément les différents mécanismes intra-cavitaires responsables de la répartition spatio-temporelle du CO_2 à l'intérieur de ces cavités.

De nombreux auteurs ont étudié la dynamique du CO_2 dans les cavités en considérant les échanges avec l'atmosphère comme des mécanismes prépondérants. Ainsi, les premières études ont été menées pour comprendre la dynamique du CO_2 dans les cavités en relation avec leur environnement extérieur (Renault, 1968 ; James, 1977 ; Ek, 1981 ; Troester and White, 1984). Plus récemment, plusieurs études ont montré des variations de CO_2 journalières et saisonnières importantes dans les cavités (Liñán et al., 2008; Kowalski et al., 2008; Kowalczk and Froelich 2010 ; Cuezva et al., 2011 ; Garcia-Anton et al., 2014 ; Fernandez-Cortes et al., 2015 ; Peyraube et al., 2016). Ces variations mettent en lumière des phénomènes de vidange et de recharge dus aux échanges entre atmosphère extérieur et cavité. En été, la température extérieure est supérieure à la température à l'intérieur de la cavité empêchant ainsi les convections à grande échelle. L'atmosphère de la cavité a tendance à atteindre un équilibre avec les concentrations de CO_2 présentes dans le réseau de microfissures. La prédominance de ces conditions confinées conduit à une augmentation des teneurs en CO_2 dans la cavité. En hiver,

la température extérieure est inférieure à celle de la cavité, l'air pénètre alors dans les cavités ouvertes. La ventilation des grottes est alors plus efficace et la dilution induit une baisse des niveaux de CO_2 (Batiot-Guilhe et al., 2007). Par ailleurs, les variations de la pression barométrique peuvent jouer un rôle important sur ces échanges à l'échelle journalière (Hakl et al., 1996).

Ces phénomènes sont expliqués de façons différentes selon les auteurs. Garcia-Anton et al. (2014) se basent sur la différence entre la masse volumique de l'atmosphère extérieure et de la cavité pour déterminer les périodes de l'année au cours desquels les échanges sont les plus importants. Kowalski et Sanchez-Canete (2010) considèrent une approche similaire basée sur les différences de la température virtuelle entre l'atmosphère et la cavité. Ces deux premières méthodes paraissent équivalentes de prime abord, cependant la notion de température virtuelle permet de caractériser les masses d'air étudiées selon leur propension à s'épandre dans l'espace. Peyraube et al. (2016), ajoutent à l'analyse des différences de masses volumiques, des mesures de vitesse d'écoulement d'air qui permettent de dissocier les périodes d'échanges entre l'atmosphère et la cavité de Cussac (Dordogne, France).

Cependant, aucune de ces méthodes ne permettent de caractériser la participation du CO_2 atmosphérique dans la quantité totale de CO_2 présente dans une cavité. Pour cela, le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 peut être utilisé.

IV.1.1.3 La composition isotopique du CO_2 dans les cavités karstiques : marqueur de l'origine et des échanges avec l'atmosphère

Les processus d'échanges entre les cavités et l'atmosphère, mais aussi les flux de CO_2 entrant sont donc considérés comme les deux mécanismes responsables de la dynamique annuelle et journalière du CO_2 dans les cavités karstiques. Comprendre les différentes origines du CO_2 de l'atmosphère des cavités ainsi que leurs différentes participations est donc une étape importante. Dans ce but, l'outil isotopique peut être d'une aide précieuse tant il permet d'évaluer la participation de CO_2 atmosphérique dans la composition de l'atmosphère. En effet, comme évoqué dans le chapitre précédent, le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 va être différent selon l'origine de ce dernier.

Dans plusieurs études (Spötl et al 2005 ; Banner et al 2007 ; Kowalczk et Froelich 2010 ; Mattey et al 2010 ; Tremaine et al 2011 ; Riechelmann et al 2011 ; Lambert et Aharon 2011;

Breecker et al 2012 ; Mandić et al 2013), l'air de la grotte est interprété comme un résultat du processus de mélange de deux pôles par diffusion et/ou de mouvement advectif des différentes masses d'air :

- Un membre lourd car peu appauvri en 13C et à faible PCO_2 : l'air extérieur,
- Un membre léger car appauvri en 13C et à forte PCO_2.

Dans le diagramme de Keeling (1958), $\delta 13\text{-}CCO_2 = f\ (1 / PCO_2)$, ce mélange est représenté comme une droite décrite par une fonction linéaire (équation 18) :

$$\delta^{13}C - CO2 = a * 1/\mathrm{PCO2} + b \qquad (18)$$

L'air de la cavité (xc = 1 / PCO_2-cavité and yc = $\delta^{13}C$-CO_2-cavité) et l'air extérieur (xe = 1 / PCO_2-ext et yc = $\delta^{13}C$-CO_2 de l'air extérieur) sont des valeurs connues de cette droite. Les propriétés de l'air extérieur sont considérées comme suit (NOAA ESRL Global Monitoring année 2016, les mesures sont effectuées sur le site Mace Head, Irlande) :

- PCO_2 : 0,0435 ± 0,0009%,
- $\delta^{13}C$-CO_2 : -9,6 ±0,3 ‰.

La position des points de mesure sur cette droite dénote de la proportion plus ou moins importante du CO_2 atmosphérique dans la composition de l'air de la cavité. Partant de ce postulat, Spötl et al. (2005) proposent une simple équation de mélange entre les deux membres extrêmes (équation 19), permettant de déterminer la proportion d'air atmosphérique dans la cavité (F).

$$\delta^{13}C - CO2\ (cavité) = \delta^{13}C - CO2\ (lourd) * F + \delta^{13}C - CO2\ (léger) * (1 - F) \qquad (19)$$

Cependant, cette interprétation et les calculs de proportion de chaque pôle qui en résultent sont fortement conditionnés par la valeur de PCO_2 et de $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger.

Ce dernier peut avoir plusieurs origines possibles : le CO_2 de l'air dans le épikarst (Kowalczk et Froelich 2010; Lambert et Aharon 2011; Breecker et al 2012) ou le CO_2 de l'air dans le sol (Tremaine et al 2011; Frisia et al.. 2011). En outre, le dégazage des eaux d'exfiltration aux spéléothèmes des cavités (Spötl et al 2005, Baldini et al., 2008 ; Faimon et al 2012), le CO_2 d'origine humaine (Liñán et al., 2008) ou à la production profonde de CO_2 (Walvoord et Striegl 2005; Benavente et al., 2010) peuvent également être impliqués dans les processus de mélange. Dans plusieurs études, les estimations de $\delta^{13}C$-CO_2 d'un membre léger

localisé dans le sol ou l'épikarst sont la pratique habituelle. Les valeurs vont de -26,1 ‰ (Lambert et Aharon 2011) à -20,7 ‰ (Tremaine et al., 2011). La plupart des études ont proposé une valeur stable ou une plage de valeurs possibles de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger proche de -22 ‰ :

- -22 ‰ pour Kowalczk et Froelich (2010),
- -22 à -21 ‰ pour Benavente et al. (2010),
- -22 +/- 1,5 ‰ pour Mattey et al. (2010),
- -23 ‰ pour Frisia et al. (2011),
- -25 à -22 ‰ pour Riechelmann et al. (2011),
- -20.6 à -23.8 ‰ pour Peyraube et al. (2016).

L'utilisation d'une valeur moyenne du $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger, par Kowalczk et Froelich (2010) leurs a permis d'appliquer un modèle de mélange à leur série temporelle de PCO_2 en continu. Cependant, les valeurs $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger peuvent varier dans le temps comme l'ont montré Peyraube et al. (2016). La principale difficulté de cette approche isotopique réside donc dans l'estimation correcte de la valeur du $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger.

IV.1.2 Etat de l'art pour l'étude de l'aérologie des cavités :

La littérature relative à la dynamique du CO_2 dans les cavités karstiques décrit les différents mécanismes physiques responsables de la répartition spatio-temporelle du CO_2. Les processus d'échanges avec l'atmosphère sont très largement étudiés. Cependant, la spécificité de la cavité de Lascaux résultante de la volonté de conservation des parois ornées, amène à penser que des mécanismes internes peuvent conditionner cette dynamique du CO_2. C'est pourquoi il est important de présenter un état de l'art de l'analyse de l'aérologie des cavités mais aussi les connaissances disponibles à ce jour pour la cavité étudiée.

L'atmosphère des cavités est généralement enrichi en CO_2, appauvri en O_2, saturé en vapeur d'eau et thermiquement à l'équilibre avec la roche entourant la cavité. La température de nombreuses grottes est proche de la température moyenne annuelle de la surface, ce qui indique qu'un ou plusieurs mécanismes sont en mesure de compenser l'effet du gradient géothermique. La conduction thermique à travers le massif sus-jacent en est un. Lacanette et al. (2009) parviennent en effet à reproduire la répartition spatio-temporelle des températures dans la cavité de Lascaux à partir de ce mécanisme qui intégré dans un simulateur 3D de la Grotte de Lascaux.

Outre la conduction thermique à travers la formation rocheuse, l'infiltration de l'eau de pluie ainsi que la ventilation de la grotte par les ouvertures macroscopiques (Luetscher et Jeannin, 2004) ont été proposés comme des mécanismes importants pouvant expliquer un faible gradient thermique vertical dans les zones karstiques. Résultante des variations climatiques saisonnières, la ventilation est surtout observée dans les grottes présentant une ouverture supérieure (De Freitas et al, 1982 ;. De Freitas et Schmekal, 2003; Bourges et al., 2006; Sanchez-Cañete et al., 2011; Kowalski et Sanchez-Cañete, 2010). Pour les grottes à simple ouverture, en hiver, l'air extérieur froid et dense est entraîné dans la grotte par thermoconvection et la grotte est donc dans un régime ouvert. En été, la stratification de l'air se met en place entre l'air le plus chaud et plus léger à l'extérieur et l'air froid, riche en CO_2, en vapeur d'eau et plus dense de l'atmosphère des cavités ; la grotte est donc dans un état stable et confiné vis-à-vis de l'atmosphère. Bourges et al., (2006) montrent que même en hiver, les parties d'une cavité située à grande distance de l'entrée, pourraient être isolées de la ventilation par convection et par conséquent pourrait se trouver dans un état confiné. En revanche, les grottes avec deux ouvertures à différents niveaux présentent un état non confiné à la fois en hiver et en été en raison d'un effet de cheminée : en hiver, l'air froid extérieur pénètre dans la grotte par l'ouverture inférieure, est chauffée à l'intérieur de la grotte et échappe par l'ouverture supérieure. À l'inverse, en été, l'air froid s'échappe par l'ouverture inférieure et entraîne l'air extérieur chaud qui entre alors dans la grotte par l'ouverture supérieure.

À l'intérieur d'une zone confinée, les changements de température sont dus à la chaleur générée lors de la compression ou l'expansion de l'air induite par les variations barométriques. Il a été démontré qu'après un amortissement partiel par conduction dans les parois rocheuses de l'onde thermique, les changements de température sont corrélés à la dérivée première temporelle de la pression.

Même dans des grottes confinées, les frontières chimiques et thermiques nettes observées limitent les différents compartiments stables d'une grotte. Chaque compartiment est caractérisé par une température stabilisée et une composition de l'air différente. L'entrée permanente d'un air enrichi en CO_2 à travers les fractures et fissures prouve que la stabilité de l'atmosphère souterrain ne résulte pas d'un système fermé, mais plutôt d'échanges stabilisés entre la grotte et l'atmosphère extérieure à travers le système karstique (Mangin et al., 1999; Bourges et al, 2001 ; Kowalczk et Froelich, 2010; Garcia-Anton et al., 2014b).

En conséquence, il apparaît que les cavités bénéficient généralement d'une capacité naturelle de régulation résultant de leur développement dans un système karstique actif ou d'un paléokarst. A l'intérieur de ces grottes, des peintures et des ornements se trouvent à une triple interface, impliquant la roche, l'air et l'eau soit sous forme d'un film à la surface de la paroi, ou en phase liquide dans les pores de la roche (Benavente et al, 2009), l'air étant soumis aux instabilités les plus fortes. Le suivi d'une série de traceurs (CO_2, température, 222Rn, CH4, *etc.*) permet de caractériser la stabilité des différentes parties de grottes et de les diviser en zones confinées, semi-confinées ou ouvertes sur l'atmosphère extérieure. Les zones confinés présentent de très faibles variations de leurs paramètres thermodynamiques (par exemple des changements de température de moins de quelques 0.01° C), ce qui assure la conservation de leur système physique naturel et de leurs vestiges archéologiques. Inversement, les zones ouvertes, généralement situées à proximité des entrées des grottes, présentent des paramètres instables et sont généralement dépourvues de tout ornement mural fragile.

IV.1.3 Etat des connaissances sur l'aérologie de la cavité de Lascaux

La température des parois est déterminée par le flux de la chaleur à travers la roche ; par le flux de chaleur entre l'air et la paroi; par les phénomènes de condensation/évaporation qui se produisent avec échanges de chaleur; et par l'effet thermique du rayonnement des personnes et des projecteurs. La température de l'air est pratiquement en équilibre thermique avec celle de la roche tout le long de l'année. Autour de cette moyenne la température subit une variation périodique à peu près sinusoïdale d'amplitude 0,5°C et de période annuelle correspondant à l'onde thermique annuelle provenant de la surface se propageant et s'atténuant à travers les couches géologiques constituant le sous-sol, et qui atteint les différents points de la cavité avec une intensité et un retard différent suivant leur profondeur.

Dans le détail la température de surface ne suit pas complètement la variation de la température de la roche. Des phénomènes thermiques liés à l'évaporation, la condensation des eaux superficielles, le comportement comme un corps noir de la cavité tendant à homogénéiser les températures, la présence humaine même exceptionnelle font que des écarts de quelques dixièmes de degrés Celsius peuvent apparaître plus ou moins localement et furtivement. On peut constater qu'en l'absence de perturbations la Salle des Taureaux rayonne comme un corps noir et est isotherme sur toute sa surface à moins de 0,2°C près sans discontinuité thermique.

Malaurent et al. (2012) montrent qu'en plus d'être contraintes par la conduction de l'onde thermique provenant de la surface, les températures de l'air et de la roche mesurées dans la cavité sont affectées par les eaux d'infiltration. En effet, une augmentation du débit au SAS1 se traduisant par un pic significatif de crue (c'est à dire se différenciant très nettement du débit de base de la nappe) peut entraîner en période hivernale une baisse notable de la température de la roche et de l'air, quand elle entrainera, en fin de période estivale une augmentation de la température. En période hivernale cela correspond à l'arrivée à l'exutoire de la nappe, d'eau relativement froide (pluie, neige fondue). A la fin de la période estivale, l'eau généralement plus chaude circule dans un terrain plus chaud qu'en hiver alors que la zone de l'exutoire est plus froide, provoquant alors un réchauffement conséquent. Des périodes intermédiaires durant lesquelles l'onde de crue semble précédée par une augmentation de la température illustrent un phénomène de chasse de l'eau ou de l'air contenues dans le massif. Le cycle climatique externe n'étant pas intégralement reproductible d'une année sur l'autre, les périodes chaudes ou froides sont plus ou moins précoces ou tardives dans la grotte.

Cette répartition spatio-temporelle des températures dans la cavité est à l'origine de mouvements d'air qui ont été étudiés depuis le début des années 60. En effet, l'ensemble des observations réalisées suite aux travaux de la première Commission Scientifique a permis de mettre en évidence des cellules de convection et de compartimenter la cavité en zones ou systèmes. Deux zones de ventilation naturelle à peu près indépendantes : le système I (Salle des Taureaux et Diverticule Axial) et le système II (Salles Ensablées, Grande Diaclase, Puits, Abside, Nef, et Galerie à Mondmilch), ces deux derniers étant reliés par le Passage à l'intérieur duquel les mouvements d'air convectifs sont restreints. Ces mécanismes aérologiques sont bien reproduits par le simulateur 3D de la Grotte de Lascaux (Lacanette et al., 2009) qui permet une estimation des vitesses d'écoulement d'air dans les différentes zones de la cavité.

Pour que ces convections se réalisent, la cavité étant en pente, la température de l'air dans les parties profondes doit être plus élevée que la température de l'air près de la surface. Celle des parties profondes varie peu au cours du temps et constitue le résultat d'un équilibre fin entre le transfert de chaleur par le sol, les variations de température à la surface, les calories portées par les fluides qui s'infiltrent (eau, vapeur, dioxyde de carbone) et les transferts de chaleur aux parois (changement de phase, convection, radiation).

Les mouvements d'air peuvent aussi être engendrés par des échanges avec l'extérieur :

- Soit par différence de densité entre l'air extérieur et l'air intérieur ;
- Soit grâce à des variations de la pression atmosphérique.

La grotte étant de type descendant toutes les communications possibles sont à une cote bien supérieure à celles des galeries. De ce fait, seul l'air lourd et froid à faible pression de vapeur peut entrer dans la cavité et chasser l'air de la grotte plus léger plus chaud et à plus grande pression de vapeur. Cependant, les échanges d'air par ce processus sont très faibles voire non mesurables dans le cas de la cavité de Lascaux à cause des SAS de protection mis en place.

IV.2 Matériel et méthode

En résumé, l'aérologie de la cavité de Lascaux présente une dynamique spécifique et complexe du fait des aménagements conséquents réalisés depuis sa découverte. De plus, l'intérêt archéologique de cette dernière rend son accès et son étude difficile du point de vue des observations *in-situ*.

Pour comprendre la dynamique du CO_2 et l'aérologie de la cavité de Lascaux, cette étude s'appuie sur le dispositif de mesure en continu des paramètres hydroclimatiques et des teneurs en CO_2 implanté sur le site de la grotte de Lascaux. Cette sous-partie a donc pour objectif principal de décrire précisément ce dispositif complexe. Dans un second temps, la stratégie mise en œuvre pour l'étude des signaux isotopiques du CO_2 est détaillée pour finir par la présentation du protocole mis en place pour l'étude de l'impact du pompage sur l'aérologie de la cavité.

IV.2.1 Suivi en continu des paramètres hydroclimatiques externes et internes ainsi que des teneurs en CO_2 dans la cavité

IV.2.1.1 Les mesures hydroclimatiques extérieures

Comme évoqué au cours du chapitre 2, sur le site de Lascaux, le système de mesure des paramètres hydroclimatiques de l'atmosphère externe est composé de trois stations météorologiques différentes. L'une est située au-dessus de l'entrée de la grotte; les deux autres sont situées sous les chênes et les pins de la couverture forestière. Ces stations météorologiques enregistrent la température de l'atmosphère extérieure et du sol, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique et les hauteurs et intensités des précipitations chaque minute. L'étude de ces paramètres permettra d'évaluer l'influence de l'atmosphère extérieure sur la cavité.

IV.2.1.2 Les mesures hydroclimatiques et des PCO_2 dans la cavité

Au cours des cinq dernières années, un système complet de surveillance des paramètres hydroclimatiques et des teneurs en CO_2 a été installé dans la grotte de Lascaux. Le dispositif complet comprend plus de 120 capteurs différents répartis dans la zone ornée de la cavité mais aussi dans les SAS et la Salle des Machines. L'analyse conduite au cours de ces travaux de thèse se fera en considérant 75 capteurs (les capteurs relatifs au fonctionnement de la machinerie de conditionnement de l'air ne sont pas utilisés).

Les paramètres considérés seront donc les suivants : température de l'air et de la roche (paroi), PCO_2 et PO_2 de l'air, pression atmosphérique interne et débit de l'émergence épikarstique. L'emplacement des capteurs dans la grotte est présenté en Figure IV-1. Le tableau en **Annexe 6** présente la nomenclature, la localisation et la situation dans chaque salle de la cavité des différents points de mesure utilisés au cours de l'étude.

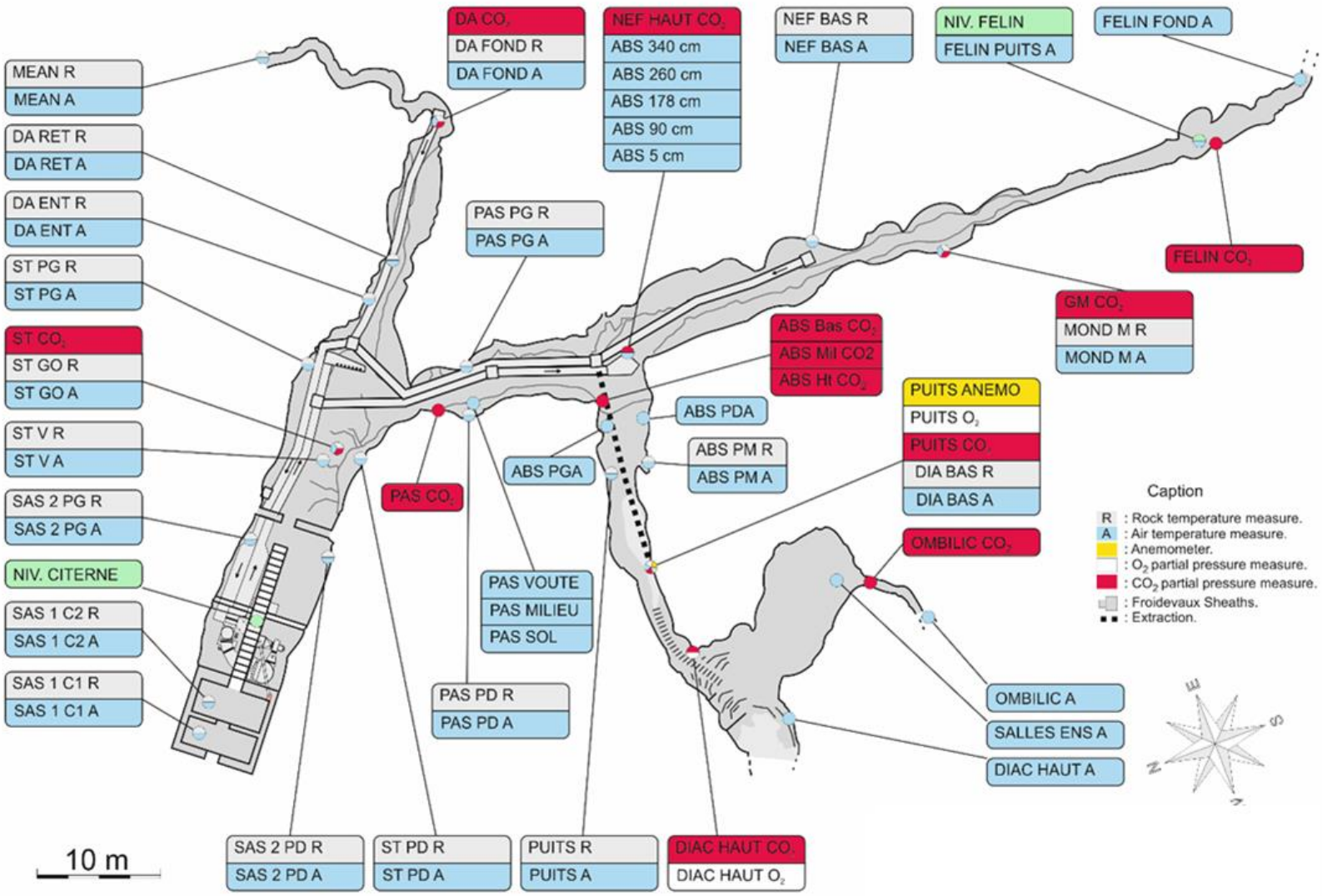


Figure IV-1 : Localisation des différents capteurs implantés dans la cavité de Lascaux et utilisés au cours de l'étude.

La PCO_2 de l'air est ainsi enregistrée en au moins un point de chaque salle de la cavité, à l'exception de l'Abside dans laquelle 4 capteurs ont été implantés. Ce maillage de mesure important doit permettre une analyse fine de la répartition spatio-temporelle de ce gaz dans la cavité. La majorité des capteurs sont positionnés de 30 à 50 cm de hauteur par rapport au sol de la cavité. Ce positionnement n'est pas anodin, en effet, du fait de sa forte masse moléculaire, ce gaz a tendance à être plus concentrée dans la partie inférieure de la colonne d'air. Le mât de mesure des PCO_2 à 3 hauteurs différentes par rapport au sol dans l'Abside doit permettre la détermination du gradient vertical de CO_2. Au total ce sont 15 carbonimètres qui sont installés dans la cavité. Toutes les valeurs de PCO_2 sont mesurées à l'aide des capteurs de CO_2 Infrarouge du fabricant Vaisala, calibrés à l'aide de gaz étalons (GMP 221, précision de ± 0,2% de la mesure, la sensibilité de ± 0,001% de précision). Ces mesures de dioxyde de carbone réalisées à des températures et des pressions différentes des conditions d'étalonnage doivent être corrigées. Pour cela, l'équation 12 (III.2.2.2) est utilisée.

Les teneurs en O_2 sont quant à elles mesurées en deux cavités (BD et HD) à l'aide de capteurs chimiques (FY9600O2, Alhborn, précision : ±1%). Ils sont placés en parallèle des capteurs de PCO_2 pour vérifier l'anticorrélation entre ces deux paramètres qui confirmerait l'origine biogénique du CO_2.

Les mesures de température sont effectuées par des capteurs PT100 situés dans l'air et la roche (précision de ± 0,3 °C). L'étalonnage inter-sondes réalisé avant leur implantation dans la cavité permet d'atteindre une sensibilité de mesure de 0,001 ° C. Ces capteurs sont positionnés autant que faire ce peu à des points stratégiques comme la proximité du sol, la voûte et les parois. La stratégie d'échantillonnage consiste en l'installation de couples de mesure (air et roche) pour chaque paroi de chaque salle de la cavité. La différence entre les deux températures est considérée comme un indicateur de la présence probable de processus de condensation (Troche < Tair) ou d'assèchement (Troche > Tair). Cependant, la forte proportion de parois ornées ne permet pas ces deux mesures pour chaque zone comme c'est le cas par exemple dans l'Abside ou seule la température de l'air est enregistrée à proximité de chaque paroi. Les sondes positionnées au sol et à la voûte dans la Salle des Taureaux, le Passage et l'Abside témoignent elles du gradient thermique dans la colonne d'air de ces différentes salles. Au total, 55 points de mesure (air et roche inclus) sont à notre disposition.

La pression atmosphérique à l'intérieur de la grotte est mesurée à l'aide d'un capteur Vaisala (précision et sensibilité de ± 0,1 hPa). Le débit de l'émergence épikarstique est évalué

à partir de la mesure de niveau d'eau réalisée dans la citerne de récupération par un capteur de pression Vaisala (précision et sensibilité de ± 0,1 hPa).

Les mesures effectuées par tous ces capteurs à l'intérieur de la cavité sont enregistrées toutes les minutes depuis l'année 2012 par AMR WinControl (Akrobit®) logiciel, spécialement développé pour l'acquisition de données avec les dataloggers Almeno (Alhborn®). Les données sont accessibles à distance grâce au serveur sécurisé de ce logiciel qui permet leur surveillance à partir de l'interface graphique.

Les différentes séries temporelles recueillies dans la cavité mais aussi à l'extérieur permettent de déterminer la masse volumique des différentes masses d'air obtenues à partir des équations 14, 15 et 16 (III.2.2.2)

IV.2.2 Les prélèvements d'air pour l'étude du signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 dans la cavité de Lascaux

En outre, des échantillons d'air ponctuels sont réalisés dans des bouteilles en verre hermétiques de 0.5 L (Figure IV-2) dans différentes zones de la cavité pour analyser le $\delta^{13}C$-CO_2 et déterminer l'origine du CO_2 et la proportion d'air atmosphérique entrant dans la cavité selon les conditions climatologiques externes mais aussi les conditions aérologiques de la cavité.

Figure IV-2 : Ampoules en verre de 500 ml utilisée pour les prélèvements de gaz.

Pour cela, des points de prélèvement ont été sélectionnés de façon à ce qu'ils représentent les différentes conditions rencontrées dans la cavité (PCO_2, isolement vis-à-vis de l'atmosphère, proximité avec la surface, *etc.*). Ces points de prélèvements sont les suivants :

- Salle des Taureaux,
- Galerie Mondmilch,

- Bas de la Diaclase (Puits du Sorcier),
- Haut de la Diaclase,
- Salles Ensablées.

Une grande précaution est apportée au cours du prélèvement. En effet, pour ne pas fausser les mesures, les prélèvements sont réalisés dans des périodes au cours desquelles la cavité est peu fréquentée (au minimum deux jours après une intervention humaine). De plus, l'opérateur veille à ne pas respirer avant la réalisation du prélèvement dans chaque salle. Une première série de prélèvement a été réalisée le 28/05/2014. Les photographies des points de mesure sont présentées en Figure IV-3. Quatre autres campagnes de prélèvement ont suivi durant les années 2015 et 2016.

Figure IV-3 : Prélèvements de gaz dans la cavité avec de gauche à droite : la Salle des Taureaux, les Salles Ensablées, le Puits du Sorcier, la Galerie Mondmilch et le Haut de la Diaclase.

Les échantillons ont été envoyés à la LAB / ISO (BRGM) et analysé avec un chromatographe en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (Gas Bench avec Delta +XP; reproductibilité de 0.03‰).

IV.2.3 L'arrêt de l'extraction pour l'étude de l'impact du pompage sur l'aérologie de la cavité

Le pompage n'étant pas pris en compte dans le simulateur 3D de la grotte de Lascaux, pour apporter des éléments de réponses quant à ses impacts potentiels sur l'aérologie, la dynamique du CO_2 ainsi que le comportement des eaux vis-à-vis de la calcite aux parois de la cavité de Lascaux, il était nécessaire de pouvoir observer une période d'arrêt de l'extracteur

d'air d'une durée importante pour pouvoir statuer sur les questionnements des gestionnaires de la cavité. Cet arrêt qui avait été au préalable inclus dans le projet de recherche à la demande des deux parties devait aussi permettre de définir les conditions aérologiques que l'on peut qualifier par abus de langage de « naturelles ». En effet, la cavité ayant été fortement remaniée depuis son invention, il est probable que ces conditions soient tout de même différentes. Cependant, les potentielles perturbations pouvant survenir suite à cet arrêt du pompage ont nécessité la mise en place d'un protocole de surveillance multidisciplinaire précis regroupant des suivis photographique, microbiologique et de l'état hydrique des parois. En complément, le laboratoire I2M a produit un protocole de suivi des paramètres hydroclimatiques de la cavité à la demande de la DRAC et du Conseil Scientifique. Ce protocole de suivi est présenté en **Annexe 7**. En parallèle, trois capteurs de teneurs en CO_2 ont été installés sur un mât dans l'Abside pour déceler d'éventuelles concentrations de CO_2 pouvant affecter la santé du personnel intervenant dans la cavité. Comme évoqué précédemment, ces capteurs permettront de déterminer le gradient vertical de PCO_2 dans cette zone de la cavité.

La Direction Régionale des Affaires Culturelles d'Aquitaine ainsi que le Conseil Scientifique ont alors autorisé l'arrêt de l'extracteur d'air du Puits du Sorcier pour une période de 6 mois à partir du 14 Janvier 2015. La période d'essai s'était déroulée sans accrocs, la décision a été prise de continuer l'arrêt de l'extraction de l'air jusqu'à nouvel ordre tout en maintenant les suivis mis en place.

Plus d'une année et demie d'enregistrement des paramètres hydroclimatiques est donc à notre disposition. De plus, trois campagnes de prélèvements d'air pour l'analyse du signal isotopique du CO_2 ont été effectuées durant cette période. La comparaison de ces données avec celles enregistrées en contexte de pompage devra conduire à démontrer les éventuels impacts de ce dispositif d'extraction de l'air sur la conservation des parois ornées de la cavité.

IV.3 La dynamique du CO_2 et l'aérologie dans la cavité de Lascaux en contexte de pompage

Cette troisième partie a pour objectif de présenter les principaux résultats et interprétations relatifs à la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux lorsque l'extracteur d'air est en fonctionnement. Ainsi, les séries temporelles acquises aux cours des années 2013 et 2014 seront utilisées. Les données de PCO_2 et de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ de l'air seront en premier décrites.

L'analyse et l'interprétation des différents mécanismes aérologiques responsables de la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux seront ensuite détaillées.

IV.3.1 Les données disponibles

IV.3.1.1 Les teneurs en CO_2

Les PCO_2 enregistrées du 1 Janvier 2013 au 31/12/2014 dans 8 zones différentes seront utilisées au cours de cette partie. Le Tableau IV-1 présente les statistiques descriptives des différentes séries temporelles de PCO_2 à notre disposition, calculées pour les années 2013 et 2014.

Tableau IV-1 : Description statistique des différentes PCO_2 mesurées dans la cavité en 2013 et 2014. Le capteur de PCO_2 en Haut de la Diaclase (HD) n'a été installé qu'en 2014.

Point de mesure	2013			2014		
	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Coefficient de variation(%)	Moyenne (%)	Ecart type (%)	Coefficient de variation(%)
ST CO2	0.21	0.11	52%	0.2	0.08	40%
DA CO2	0.42	0.19	45%	0.43	0.14	33%
PAS CO2	0.41	0.13	32%	0.4	0.13	33%
NEF CO2	0.96	0.52	54%	0.99	0.55	56%
GM CO2	2.28	0.57	25%	2.49	0.5	20%
CF CO2	2.37	0.53	22%	2.58	0.46	18%
BD CO2	0.91	0.82	90%	0.88	0.96	109%
HD CO2				0.36	0.15	42%

Les valeurs obtenues permettent de construire l'histogramme (Figure IV-4) représentant les moyennes annuelles des différentes séries temporelles de PCO_2 mesurées dans la cavité en 2013 et 2014.

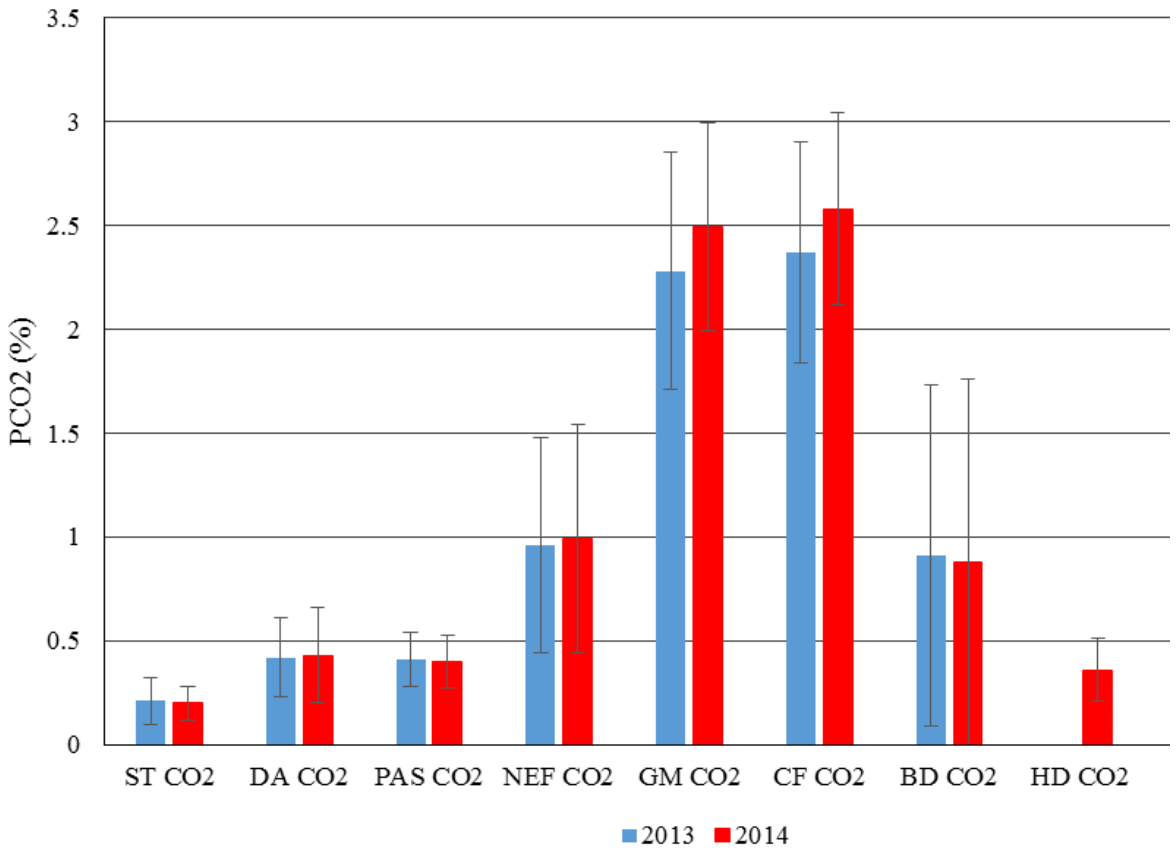


Figure IV-4 : Comparaison des moyennes annuelles de PCO_2 mesurées dans les différentes salles de la cavité en 2013 et 2014.

Les valeurs moyennes des années 2013 et 2014 permettent de réunir les différents points de mesure selon trois groupes :

- ST, DA, PAS et HD qui témoignent des PCO_2 les plus faibles dans la cavité comprises entre 0.2 et 0.4 %,
- NEF (ou ABS) et BD qui sont caractérisés par des teneurs en CO_2 moyennes comprises entre 0.8 et 1.0 %),
- GM et CFF qui constituent les points de la cavité où les PCO_2 moyennes sont les plus importantes (comprises entre 2.28 et 2.58 %). La PCO2 moyenne annuelle est supérieure en ces deux points pour l'année 2014.

Les coefficients de variation ainsi que les écarts types montrent que la variabilité des teneurs en CO_2 diminue globalement avec la profondeur (Cv ST > Cv DA > Cv PAS > Cv GM et CF). Cependant, deux points de mesure montrent des exceptions avec ABS mais surtout BD dont le coefficient de variation est compris selon les années entre 90 et 110 %.

Qu'en est-il de l'évolution des teneurs en CO2 dans ces différentes zones de la cavité au cours de l'année ? La Figure IV-5 permet de répondre partiellement à cette question en présentant l'évolution des teneurs en CO_2 moyennes mensuelles de Janvier 2013 à Décembre 2014.

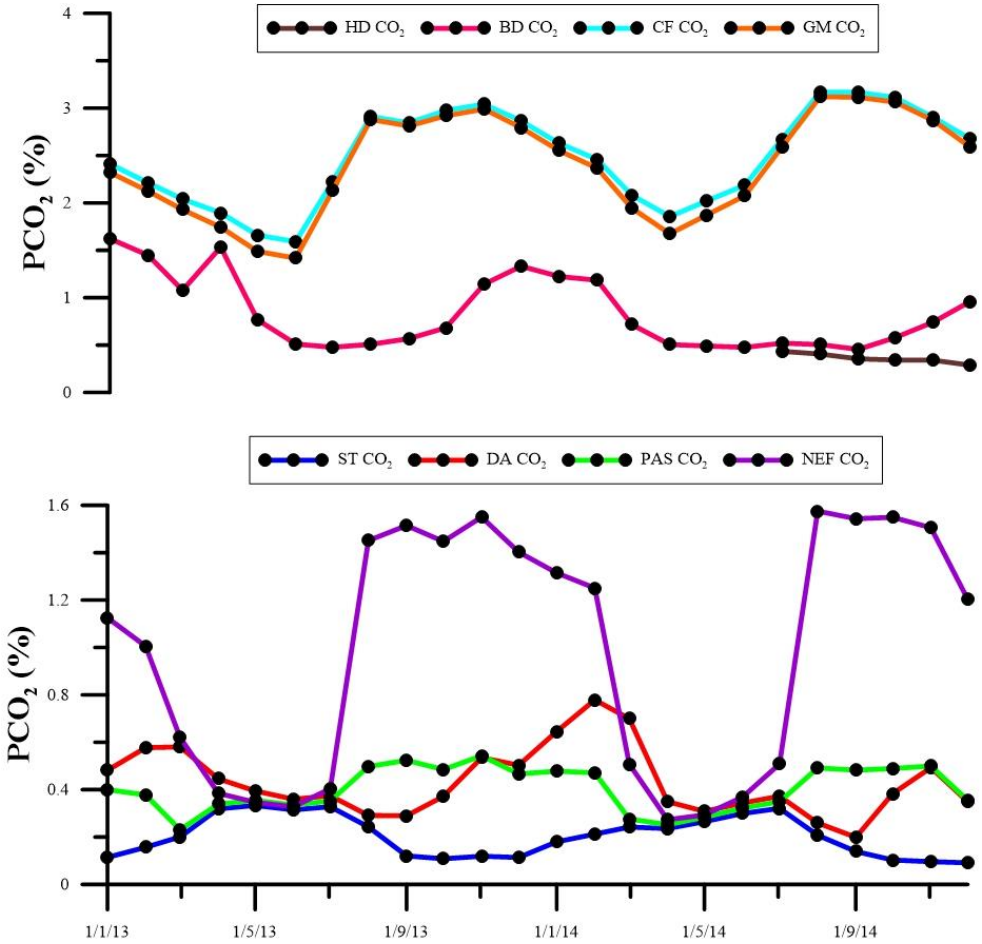


Figure IV-5 : Evolution des moyennes mensuelles de PCO_2 mesurées dans les différentes zones de la cavité de 2013 à 2014.

Les teneurs en CO_2 moyennes mensuelles aux points GM et CF montrent une évolution similaire au cours de l'année avec des valeurs qui diminuent progressivement du mois de Janvier au mois de Mai 2013 et passent de 3.0 % à 1.5 %. Inversement, les teneurs en CO_2 dans ces zones de la cavité augmentent fortement au cours de l'été pour passer de 1.5 % à 3.0 % au mois d'Août 2013. Les valeurs restent alors stables jusqu'au mois de Décembre 2013 ou ces dernières diminuent à nouveau progressivement jusqu'au mois d'Avril 2014 (1.7 %). Les teneurs en CO2 augmentent alors de Mai 2014 à Août 2014 pour atteindre à nouveau plus de 3.0 %, rester stables jusqu'en Octobre 2014 et diminuer ensuite lentement jusqu'à la fin de l'année. Cette évolution sinusoïdale des teneurs en CO_2 dans cette zone profonde de la partie droite de la grotte de Lascaux semble similaire à celle observée dans les différents forages de

la parcelle expérimentale. La teneur en CO_2 de cette zone de la cavité paraît donc influencée par l'évolution de la teneur en CO_2 dans l'épikarst.

Au point BD, les teneurs en CO_2 sont moins importantes au cours des différents mois de l'année, mais présentent toutefois une évolution assez similaire. Cependant, ces variations témoignent d'un déphasage temporel de 4 à 5 mois pour ce qui est de la phase d'augmentation de la PCO_2. Ce point de mesure se trouvant approximativement à une même profondeur que GM et CF, il parait incorrect d'expliquer cette différence par la profondeur de mesure. Un autre mécanisme semble donc influencer la teneur en CO_2 dans cette zone. Ce dernier point sera discuté ultérieurement.

Dans les zones moins profondes de la cavité (ST, DA, PAS et NEF), les PCO_2 évoluent différemment avec deux périodes distinctes qui se répètent en 2013 et 2014. Au cours des mois d'hiver, les teneurs en CO_2 moyennes sont différentes avec une augmentation selon la profondeur du point de mesure (ST PCO_2 < DA PCO_2 < PAS PCO_2 < NEF PCO_2) avec notamment des teneurs en CO_2 supérieures à 1.5 % au point NEF. Les PCO_2 moyennes deviennent alors similaires (0.3 à 0.4 %) d'Avril à Juillet 2013 et d'Avril à Juillet 2014. Au cours de ces deux périodes, la teneur en CO_2 moyenne augmente donc au point ST et diminue aux points de mesure situés plus en profondeur (DA, PAS et NEF). Ces teneurs augmentent ensuite lors de la dissociation des signaux au mois d'Août dans les zones profondes et diminuent au point ST. Ainsi, les teneurs en CO_2 sont plus importantes en hiver et en automne aux points PAS, DA et NEF. Cette tendance est différente de celle enregistrée dans les autres cavités similaires de la Dordogne et notamment dans celle de Cussac qui présente des teneurs en CO2 faibles en hiver et importantes en été.

Ainsi, plusieurs évolutions différentes sont enregistrées dans les différentes parties de la cavité de Lascaux. Il est donc probable que plusieurs mécanismes différents expliquent cette répartition spatio-temporelle des PCO_2 dans cette cavité. L'observation des séries temporelles brutes de PCO_2 enregistrées au cours des années 2013 et 2014 (Figure IV-6) vient appuyer ces hypothèses et montre dans un même temps que les teneurs en CO_2 les plus importantes (supérieures à 5 %) sont mesurées régulièrement au point BD. Ce point de mesure est situé au niveau de l'éboulis présent en partie basse de la Grande Diaclase au niveau du point de pompage de l'air. Il est donc fort probable que le pompage de l'air ait un impact particulier sur cette mesure. Cependant, la totalité de la variabilité ne peut être imputée à ce seul pompage.

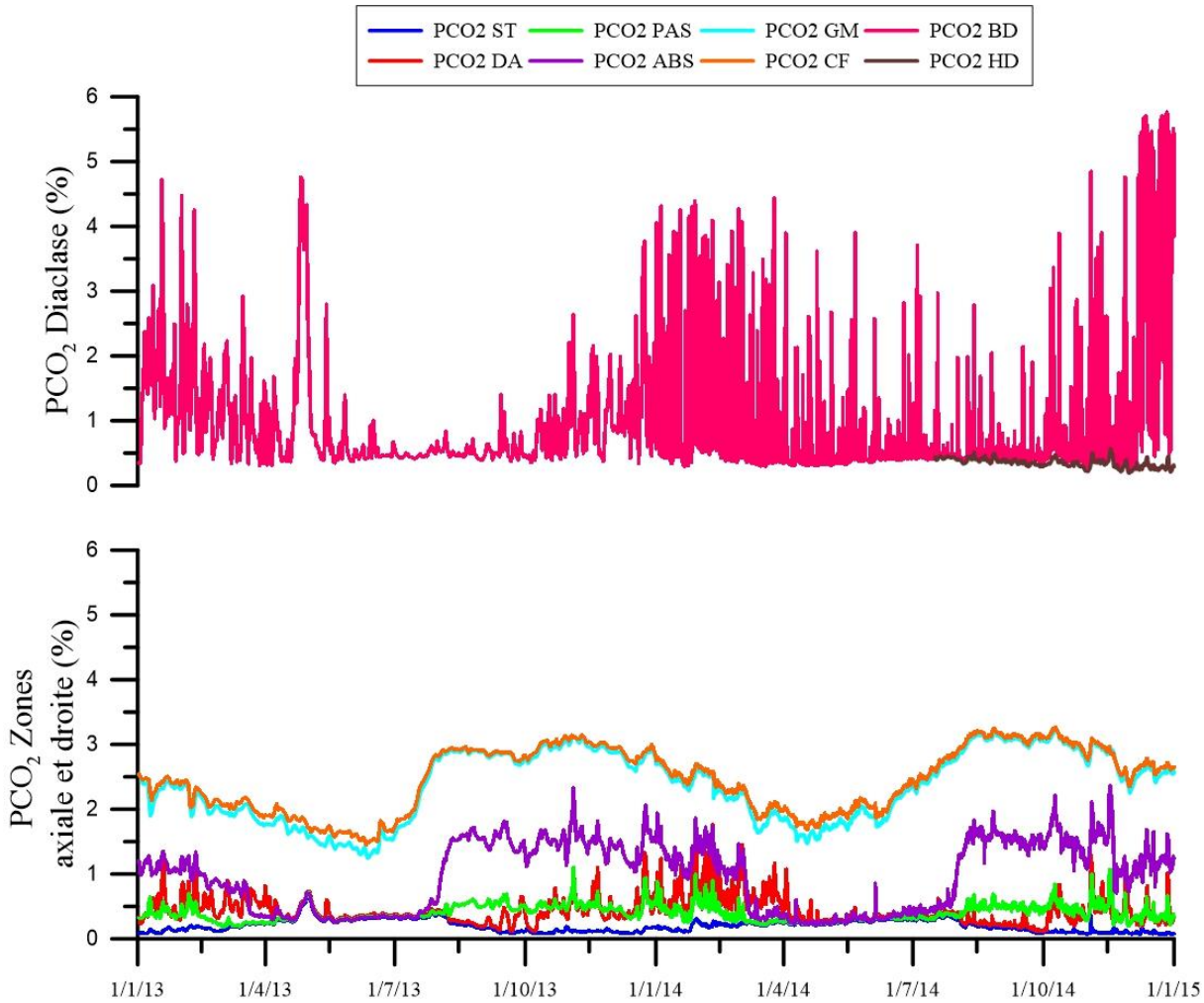


Figure IV-6 : Evolution des données brutes de PCO_2 mesurées dans les différentes parties de la cavité de 2013 à 2014. En haut, les teneurs en CO_2 mesurées dans la Grande Diaclase, en bas, les teneurs en CO_2 mesurées dans les parties axiale et droite.

IV.3.1.1.1 Les données isotopiques

Parallèlement, deux campagnes de prélèvements d'air ont permis d'analyser le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C\text{-}CO_2$) dans différentes zones stratégiques de la cavité choisies selon les teneurs en CO_2 et leur évolution au cours de l'année. Ainsi, 5 prélèvements (ST, GM, BD, HD et SE) et 7 prélèvements (ST, DA, ABS, GM, BD, HD et SE) ont été réalisés respectivement le 28/05/2014 et le 05/12/2014. Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau IV-2.

Tableau IV-2: Récapitulatif des résultats d'analyse du $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ effectuées sur les prélèvements des deux campagnes de l'année 2014. Le signal isotopique du CO_2 atmosphérique est tiré des mesures du NOAA (ESRL Global Monitoring année 2016, les mesures sont effectuées sur le site Mace Head, Irlande).

Date prélèvement	Localisation	δ13C-CO2 (‰)
28/05/2014	ATM	-9.6
	ST	-23.1
	DA	
	ABS	
	GM	-23.5
	BD	-22.7
	HD	-23.5
	SE	-24.1
05/12/2014	ATM	-9.6
	ST	-20.7
	DA	-20.7
	ABS	-24.3
	GM	-25.4
	BD	-24.9
	HD	-26.4
	SE	-24.1

Les valeurs mesurées sont concordantes avec un CO_2 d'origine biogénique et plus précisément provenant de la dégradation de la matière organique ainsi que de la respiration racinaire réalisée par des plantes C3 (présentes en surface sur le site d 'étude). Les valeurs les plus enrichies sont présentes au point BD (-22.7 ‰) pour la campagne du mois de Mai 2014 et aux points ST et DA pour celle du mois de Décembre 2014 (-20.7 ‰). Les valeurs les plus appauvries sont quant à elles mesurées aux points GM, HD et SE pour la première campagne et aux points ABS, BD, HD et SE pour la seconde. Cette variabilité de la répartition spatio-temporelle du $\delta^{13}C$-CO_2 est potentiellement conditionnée par la proportion de chaque source de CO_2 (sol/épikarst et atmosphère) différente dans chaque zone de la cavité mais aussi par la variabilité du signal isotopique du CO_2 présent dans l'épikarst et dans les sols comme nous l'avons vu au cours du chapitre 3. Une interprétation plus précise sera donnée à ces mesures au cours de cette partie et notamment lors de l'interprétation des échanges entre cavité et atmosphère.

IV.3.1.1.2 Les données de température de l'air et de la roche

La température de l'air et de la roche (paroi) est, comme nous l'avons évoqué précédemment, suivie dans les différentes salles de la cavité. Les moyennes annuelles de chaque point de mesure dans l'air de la cavité sont présentées pour les années 2013 et 2014 dans le Tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Moyennes annuelles des températures de l'air mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2013 et 2014. La différence entre l'année 2013 et l'année 2014 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert).

Moyennes Annuelles	2013	2014	Différence 2013-2014
STPGA	12.479	12.455	0.024
STPDA	12.476	12.456	0.020
STGOA	12.436	12.423	0.013
STVA	12.498	12.478	0.020
DAEA	12.454	12.434	0.020
DARA	12.458	12.437	0.021
DAFA	12.477	12.462	0.015
DAMA	12.378	12.373	0.005
PAS sol	12.498	12.483	0.015
PAS milieu	12.524	12.506	0.017
PAS voute	12.529	12.511	0.018
PASPDA	12.533	12.514	0.019
PASPGA	12.503	12.485	0.018
ABS PMA	12.566	12.562	0.005
ABS 0.05	12.631	12.620	0.011
ABS 96	12.575	12.561	0.014
ABS 326	12.569	12.560	0.010
NEFA	12.580	12.568	0.012
GMA	12.603	12.595	0.007
CF fond	12.564	12.565	0.000
PSA	12.528	12.526	0.003
BDA	12.640	12.630	0.009
HDA	12.658	12.793	-0.136
SEA	12.581	12.661	-0.080

L'analyse de ces moyennes montre des valeurs évoluant de 12.373 à 12.793 °C dans la cavité. Les températures moyennes les plus élevées pour les deux années étudiées sont observées dans la Grande Diaclase, l'Abside et la partie profonde de la zone droite (NEF, GM et CF). Les moyennes sont en effet globalement plus basses dans les zones proches de l'entrée de la cavité (ST, DA et PAS) avec notamment le point froid de la cavité rencontré dans le méandre du Diverticule Axial qui agit comme un piège à froid du fait de son isolement et de la morphologie descendante du conduit de la zone axiale. Les différences observées entre 2013 et 2014 montrent une température plus basse dans la cavité en 2014 mis à part dans la partie sommitale de la Grande Diaclase (HDA et SEA).

Cependant, l'étude des températures de l'air dans la cavité ne peut se restreindre à l'analyse des moyennes annuelles tant la variabilité de ce paramètre est importante pour comprendre l'aérologie de la Grotte de Lascaux. Pour cela, l'évolution des moyennes mensuelles des séries temporelles des températures de l'air est présentée en Figure IV-7.

La première analyse globale des séries temporelles de température montre une variation sinusoïdale de période un an dans les différentes zones de la cavité avec néanmoins un déphasage temporel selon la profondeur des points de mesure. Par exemple, un déphasage de 3 mois est montré entre la température mesurée au BD et celle mesurée en HD. Cette variabilité spatio-temporelle de la température de l'air dans la cavité vient clairement confirmer l'influence majoritaire de la conduction thermique de l'onde thermique externe, la diminution de l'amplitude de variation avec la profondeur appuyant cette hypothèse. La plus grande variabilité étant relevée en HDA (2°C) quand la plus faible est enregistrée en DAMA (0.03°C), la tendance générale étant de 0.2 à 0.3 °C de variation annuelle dans les autres zones de la cavité.

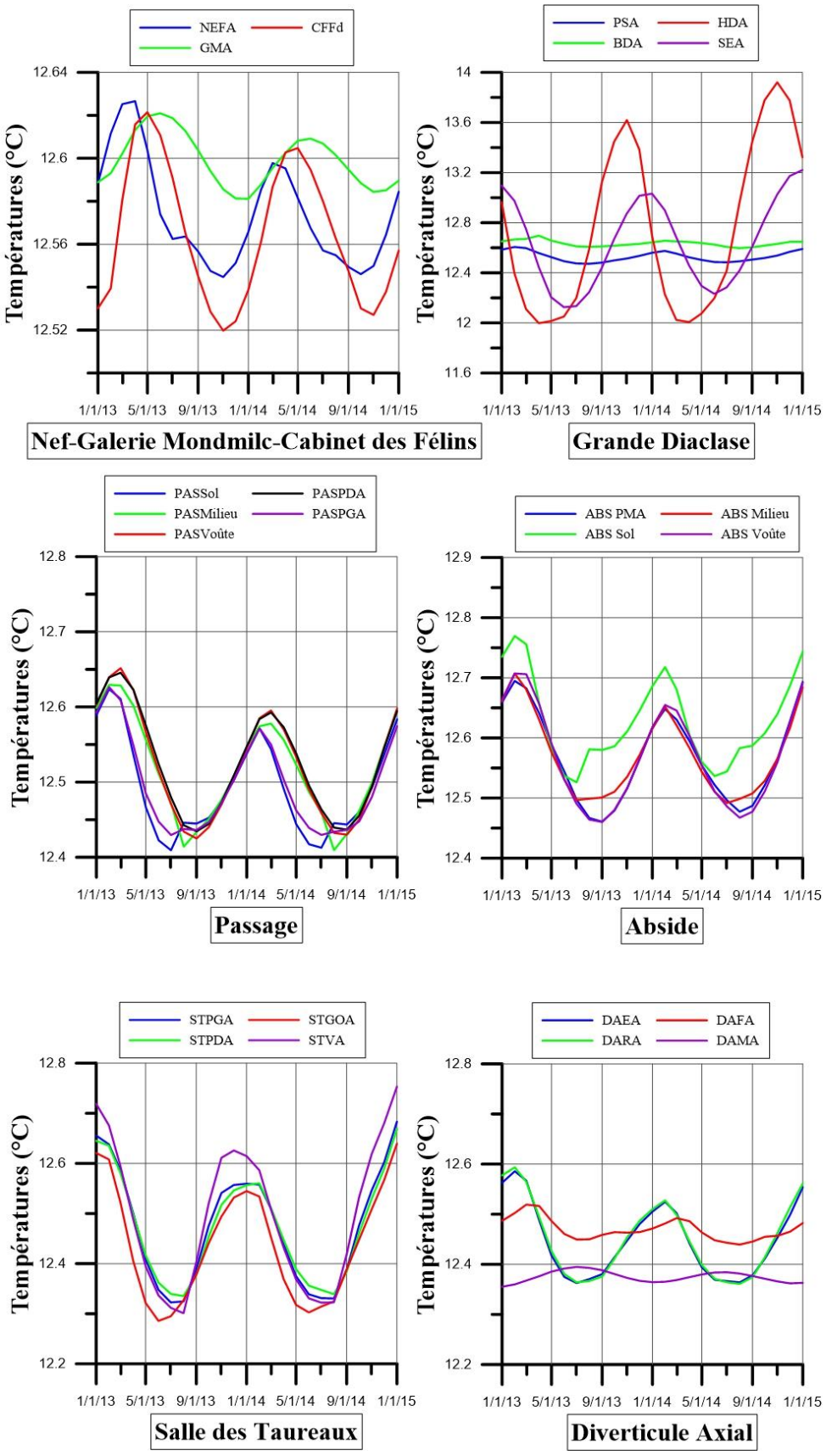


Figure IV-7 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2013 à Décembre 2014 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase.

Afin de confirmer ce mécanisme, les températures des parois de la cavité doivent être analysées. Les moyennes annuelles des températures de la roche enregistrées dans les différentes zones de la cavité sont résumées dans le Tableau IV-4. L'évolution des températures moyennes mensuelles de ces points de mesure sont montrées en Figure IV-8. L'étude de ces valeurs ainsi que de leur évolution au cours de l'année montrent une variabilité spatio-temporelle bien analogue à celle observée pour les températures de l'air. Les faibles différences sont à mettre à l'actif des interventions humaines dans la cavité qui impactent préférentiellement la température de l'air.

Tableau IV-4 : Moyennes annuelles des températures de la roche mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2013 et 2014. La différence entre l'année 2013 et l'année 2014 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert).

Moyennes Annuelles	2013	2014	Différence 2013-2014
STPGR	12.461	12.438	0.023
STPDR	12.481	12.462	0.020
STGOR	12.456	12.439	0.016
STVR	12.493	12.480	0.013
DAER	12.461	12.438	0.023
DARR	12.460	12.437	0.023
DAFR	12.482	12.466	0.016
DAMR	12.386	12.381	0.005
PASPDR	12.528	12.510	0.018
PASPGR	12.505	12.486	0.019
ABS PMR	12.565	12.560	0.005
NEFR	12.572	12.559	0.013
GMR	12.603	12.596	0.007
PSR	12.534	12.530	0.004
BDR	12.616	12.616	0.000

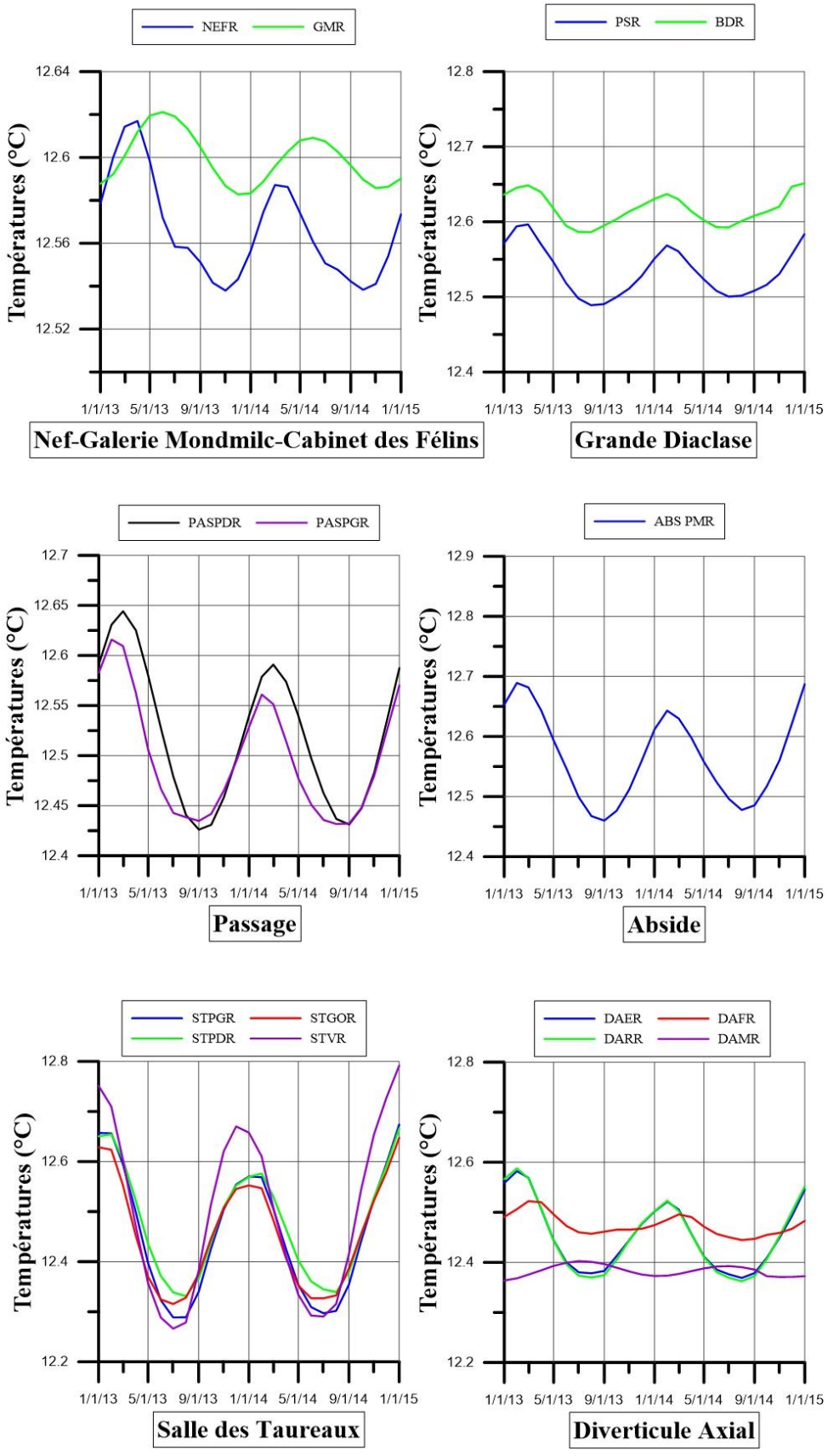


Figure IV-8 : Evolution des températures moyennes mensuelles de la roche de Janvier 2013 à Décembre 2014 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase.

IV.3.2 Les échanges entre l'atmosphère et la cavité

Pour comprendre les mécanismes d'échanges entre la cavité et l'atmosphère extérieure, il est entrepris dans un premier temps d'utiliser les différences de masse volumique entre l'atmosphère et la cavité en parallèle des teneurs en CO_2. Les données isotopiques du $\delta^{13}C$-CO_2 sont ensuite interprétées à travers le calcul de la proportion de CO_2 atmosphérique introduit dans la cavité par ces échanges.

IV.3.2.1 Etude des différences de masse volumique entre atmosphère et cavité

Dans le cas d'une cavité descendante et donc dont l'entrée est située en partie sommitale, l'analyse des différences de masse volumique entre l'air atmosphérique sus-jacent et l'air de la cavité sous-jacent peut apporter des informations importantes concernant les mécanismes de ventilation de la cavité (Garcia-Anton et al., 2014). En effet, lorsque l'air atmosphérique est plus lourd que l'air de la cavité comme cela est souvent le cas en hiver, des écoulements d'air peuvent se mettre en place de l'atmosphère vers la cavité. L'air de la cavité peut alors sortir en direction de l'atmosphère, produisant alors une diminution drastique des PCO_2.

La cavité de Lascaux étant descendante, il est donc cohérent d'utiliser cette démarche dans l'objectif de discriminer les échanges entre atmosphère et cavité. Pour cela, la Figure IV-9 présente pour l'année 2014 (comportement similaire en 2013), l'évolution de la différence entre la masse volumique de l'atmosphère et celui de la cavité avec en parallèle la PCO_2 mesurée dans la Salle des Taureaux. Les données d'entrée suivantes sont considérées pour le calcul de la masse volumique de chaque masse d'air :

- Atmosphère : température extérieure (mesurée), humidité relative (mesurée), pression atmosphérique (mesurée) et PCO_2 (fixée à 0.04 %),
- Salle des Taureaux : température STGOA (mesurée), pression interne (mesurée), ST PCO_2 (mesurée) et humidité relative (fixée à 100 %).

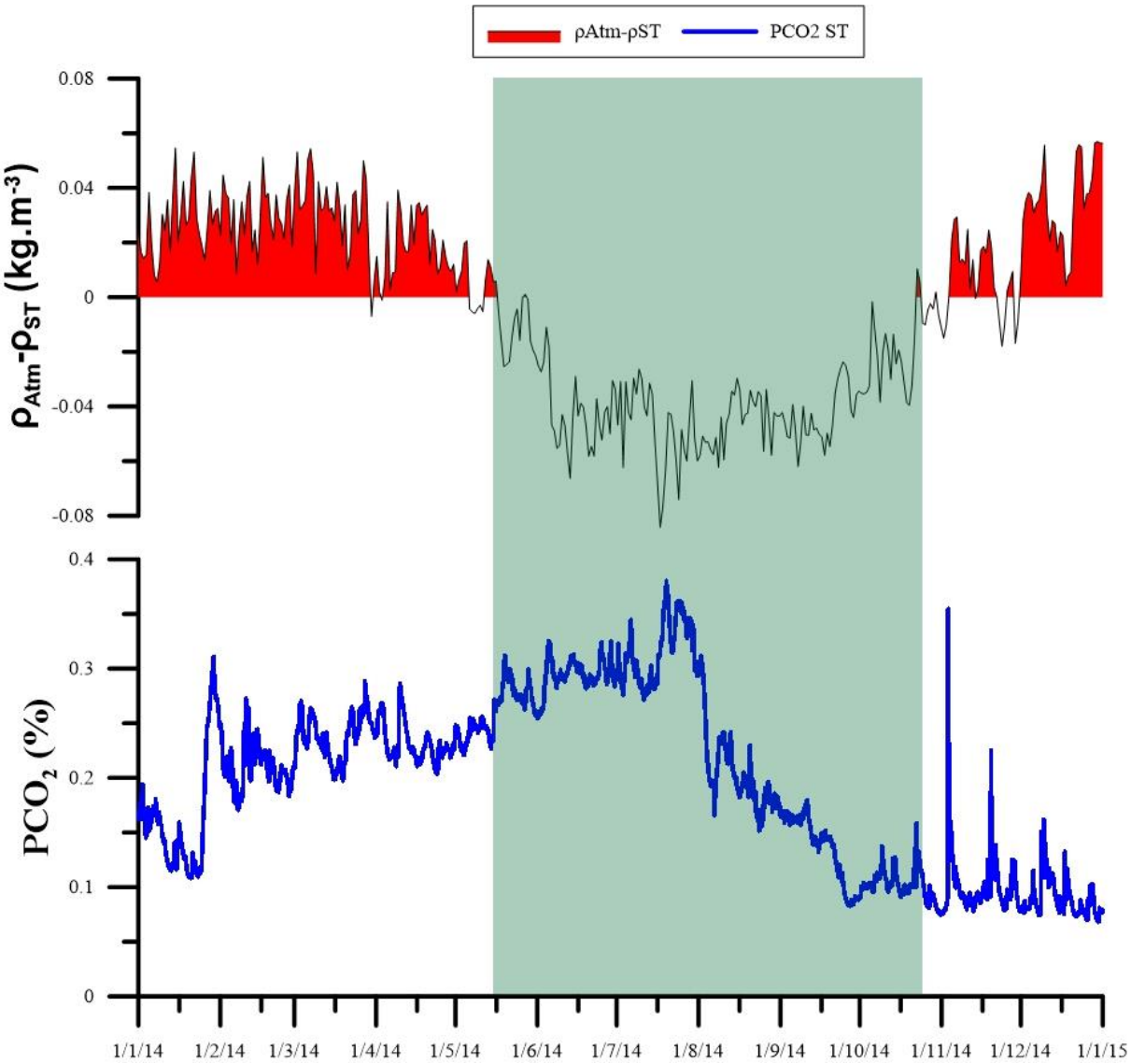


Figure IV-9 : Evolution de la différence entre la masse volumique de l'air atmosphérique extérieure et de l'air de la Salle des Taureaux pour l'année 2014. Le remplissage rouge signale les périodes au cours desquelles la masse volumique est supérieure pour l'air atmosphérique extérieure et peut donc permettre la ventilation de la cavité de Lascaux. L'évolution de la teneur en CO_2 dans la Salle des Taureaux est aussi présentée. La zone verte signale la période de l'année au cours de laquelle les échanges sont théoriquement faibles.

Les périodes propices au processus de ventilation de l'air de la cavité (rouge) sont rencontrées à Lascaux du mois de Janvier 2014 à la mi-Mai 2014, mais aussi d'Octobre 2014 à Décembre 2014. Entre ces deux périodes, l'air atmosphérique est plus léger du fait des températures plus importantes de la fin du printemps jusqu'au milieu de l'automne. Cependant, comme montré dans plusieurs cavités en Espagne (Altamira ou encore Nerja), mais aussi en Dordogne (Cussac), l'évolution de la teneur en CO_2 mesurée dans la Salle des Taureaux ne paraît pas être influencée directement par de potentielles entrées d'air atmosphérique moins chargée en CO_2. L'explication de cette absence de ventilation de la cavité provient des aménagements réalisés dans l'entrée de la cavité et notamment la mise en place du SAS 1 et de

ses trois compartiments. En effet, les mouvements d'air advectifs entre l'extérieur et la cavité sont considérablement diminués par la présence du SAS.

Cependant, cette observation ne signifie en aucun cas que les échanges entre la cavité et l'atmosphère extérieure sont nuls. En effet, les teneurs en CO_2 mesurées aux points ST, DA et PAS (les plus proches de l'entrée de la cavité) sont beaucoup plus faibles que dans les zones plus profondes telles que NEF, GM, CF et BD. De plus, le renouvellement de l'air de la cavité par le dispositif d'extraction de l'air suggère que de l'air atmosphérique entre dans la cavité tout au long de l'année. Ces échanges expliquent l'augmentation de la PCO_2 avec la profondeur comme le montre la Figure IV-10.

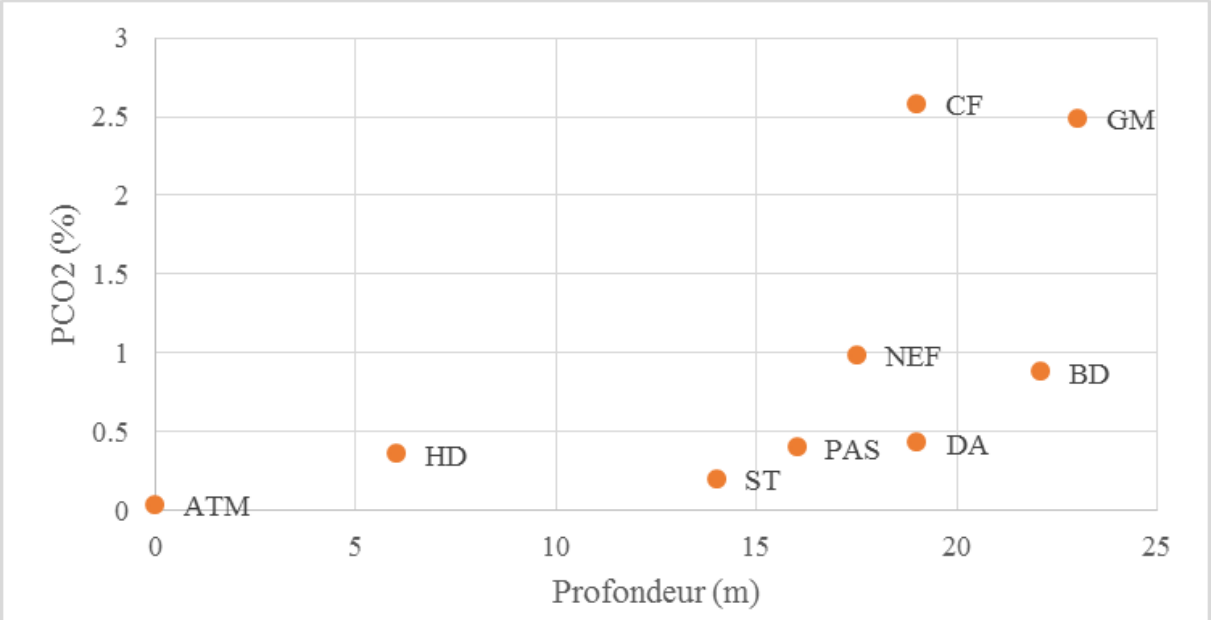


Figure IV-10 : PCO2 moyennes sur l'année 2013 en fonction de la profondeur des points de mesure.

La relation entre profondeur et PCO_2 n'est pas linéaire pour toutes les zones de la cavité. En effet, il semble que les teneurs en CO_2 aux points GM et CF ne soient pas ou peu affectées par les échanges avec l'extérieur. Cette zone profonde de la partie droite parait donc comme isolée vis-à-vis des autres parties de la cavité du fait de la morphologie de la cavité mais aussi certainement de leur isolement vis-à-vis du pompage de l'air.

IV.3.2.2 Le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 : marqueur des entrées de CO_2 atmosphérique dans la cavité ?

Les deux campagnes réalisées en période de pompage apportent des informations importantes quant aux zones de la cavité impactées préférentiellement par les entrées d'air

atmosphérique. Les 12 échantillons sont présentés dans le repère de Keeling ($\delta^{13}C\text{-}CO_2$ = f($1/PCO_2$)) en Figure IV-11, d'abord par campagne de prélèvement puis toute campagne confondue. Une échelle logarithmique est choisie pour permettre la visualisation de tous les échantillons.

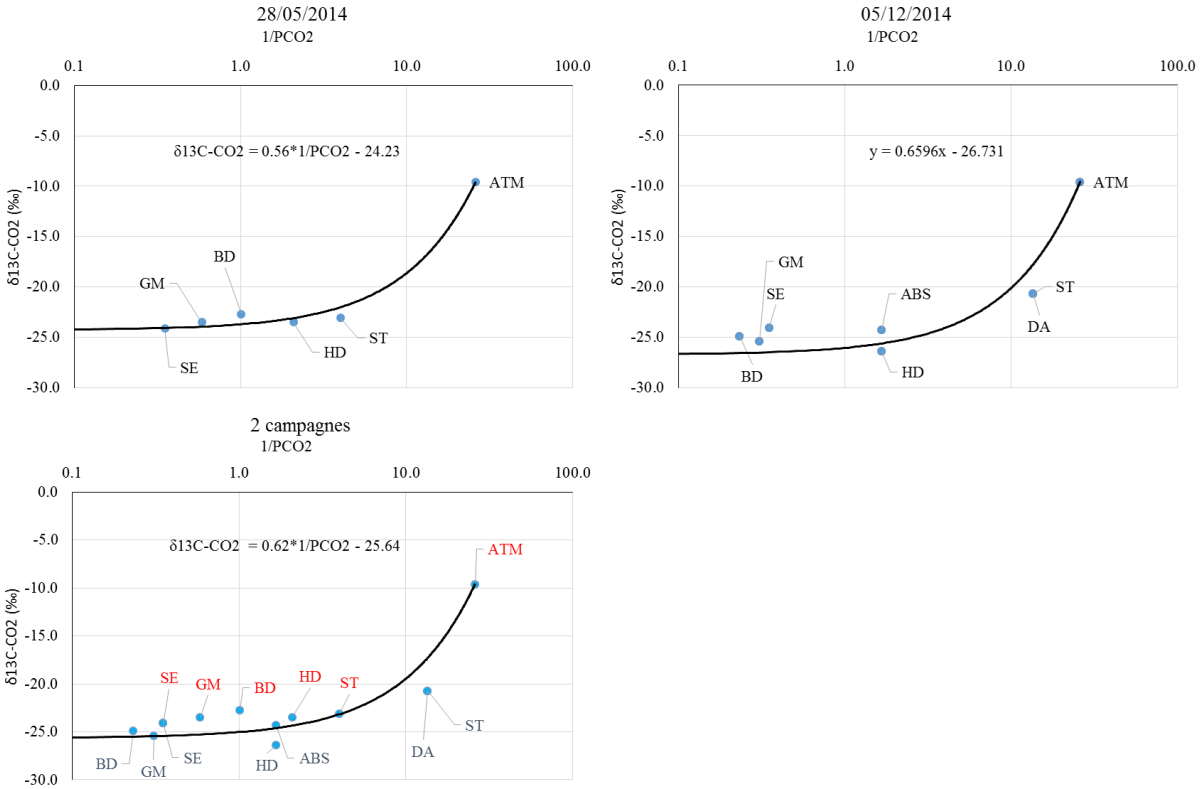


Figure IV-11 : Positionnement des différentes mesures dans le repère de Keeling pour la campagne du 28/05/2014 (en haut à gauche), du 05/12/2014 (en haut à droite) et pour les deux campagnes confondues (en bas). Une échelle logarithmique est utilisée par l'axe 1/PCO2 pour permettre une visualisation correcte des points de mesure. Les relations données pour chaque graphique représentent les équations des régressions de Keeling dans le repère $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ = f ($1/PCO_2$).

La première campagne de mesure montre des échantillons plus enrichis en 13C au niveau du point BD (-22.7 ‰) malgré une PCO_2 supérieure à celle des points ST et HD. Les autres points de prélèvements sont plus appauvris en 13C avec notamment une valeur minimale de -24.1 ‰ au niveau du point SE. La régression linéaire permet de trouver un signal moyen en 13C du membre léger d'environ -24.2 ‰ qui correspondrait au signal de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ relevé dans les forages FC1 et FC2 à cette même période.

La seconde campagne témoigne d'une répartition totalement différente des $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ avec des valeurs plus enrichies en ST et DA (-20.7 ‰) qui semble montrer une participation importante du CO_2 atmosphérique dans ces salles en période hivernale. A contrario, les autres

analyses donnent des valeurs beaucoup plus appauvries en 13 C avec notamment des valeurs de -24.9, -25.4 et -26.7 ‰ en BD, GM et HD. La participation du membre léger (valeur moyenne de -26.7 ‰) est alors beaucoup plus importante dans ces zones que celle de l'atmosphère. La considération des deux campagnes de mesure donne une valeur moyenne de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger de -25.6 ‰.

La participation de chacun des deux pôles de CO_2 (atmosphérique lourd et sol léger) est ensuite évaluée en considérant l'équation de mélange proposée par Spötl et al., (2005). Pour déterminer la proportion de CO_2 atmosphérique F (équation 20), il est nécessaire de fixer le $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger. Cette valeur est fixée à -26.7 ‰. En effet, celle-ci est cohérente avec la valeur la plus appauvrie mesurée dans le forage FR3, mais aussi avec la valeur moyenne déterminée à partir de l'équation de Keeling pour la seconde campagne de mesure.

$$F = \frac{\delta 13C-CO2_{cavité}-\delta 13C-CO2_{léger}}{\delta 13C-CO2_{atmosphère}-\delta 13C-CO2_{léger}} \qquad (20)$$

La participation de chaque pôle pour chaque point de prélèvement est présentée dans le Tableau IV-5Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et léger).

Date prélèvement	Localisation	δ13C-CO2 (‰)	% Atmosphère (F)	% Léger (1-F)
28/05/2014	ST	-23.1	21%	79%
	DA			
	ABS			
	GM	-23.5	19%	81%
	BD	-22.7	23%	77%
	HD	-23.5	19%	81%
	SE	-24.1	15%	85%
05/12/2014	ST	-20.7	35%	65%
	DA	-20.7	35%	65%
	ABS	-24.3	14%	86%
	GM	-25.4	8%	92%
	BD	-24.9	11%	89%
	HD	-26.7	0%	100%
	SE	-24.1	15%	85%

Au cours de la première campagne de mesure, F est compris entre 15 et 23 % selon les zones de la cavité. C'est au niveau de l'éboulis de la Grande Diaclase (BD) que F est le plus élevé. Différemment, au cours de la seconde campagne F évolue de 0 % au point HD jusqu'à

35 % en ST et DA, les autres points montrant des participations faibles comprises entre 8 et 15 %. Comment expliquer une telle différence entre les deux campagnes ?

Les deux campagnes ayant été effectuées pour la première au printemps et la seconde en hiver, il est probable que l'entrée d'air atmosphérique dans la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial soit facilitée au cours de la seconde campagne (05/12/2014) du fait de la différence de masse volumique importante entre l'atmosphère extérieur et la cavité à cette période de l'année. Les faibles F au cours de la même campagne dans les zones plus profondes suggèrent que ces dernières sont bien plus isolées vis-à-vis de l'atmosphère. A contrario, au printemps (28/02/2014), les différences de masse volumique entre la masse d'air extérieur et celle de la cavité sont moins propices aux entrées de CO_2 atmosphérique dans les parties superficielles de la cavité. La participation plus importante d'air atmosphérique au printemps au point BD, pourtant plus chargé en CO_2 et situé à plus de 20 m de profondeur dans une partie isolée vis-à-vis de l'atmosphère n'est pour le moment pas explicable. Néanmoins, les fortes PCO_2 dans cette zone de la cavité et leur similarité avec celles relevées dans l'épikarst profond (FR4) suggèrent la participation d'un troisième pôle « massif » (PCO_2 = 5% et $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ = -22.5‰).

IV.3.3 Principaux mécanismes aérologiques internes à l'origine de la répartition des PCO_2 dans la cavité de Lascaux :

IV.3.3.1 Influence de la pression atmosphérique sur les teneurs en CO_2 dans la cavité :

La pression atmosphérique est connue pour être responsable de la variabilité des PCO_2 dans les cavités karstiques ouvertes sur l'atmosphère. Ce mécanisme parfois nommé « pompe barométrique » a-t-il une influence sur les teneurs en CO_2 enregistrées dans les différentes zones de la cavité, malgré la présence des SAS et du pompage de l'air ?

IV.3.3.1.1 Zone Axiale et Droite

Dans un premier temps, l'évolution de la pression atmosphérique est comparée à celles des teneurs en CO_2 mesurées dans les différentes zones des parties axial et droite de la cavité. Pour cela, les séries temporelles de ces paramètres sont présentées en Figure IV-12 pour la période du 01/01/2014 au 01/06/2014.

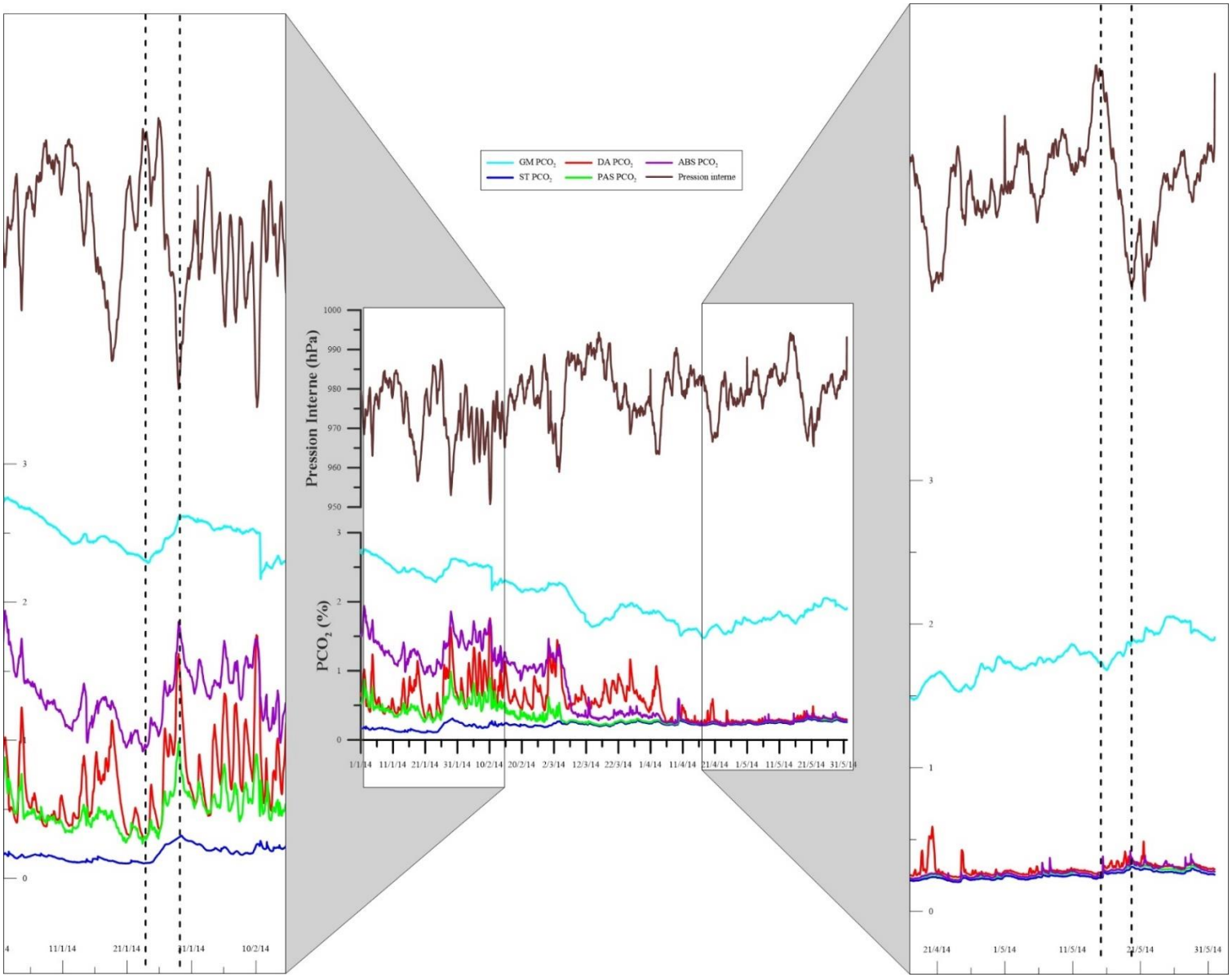


Figure IV-12 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et des PCO2 mesurées dans les parties axiale et droite de la cavité du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique.

La pression atmosphérique joue donc un rôle analogue à celui observé dans le forage FR3 de la parcelle expérimentale. Cette dernière de par ces variations, va entrainer des phases de compression et décompression de la masse d'air de la cavité et ainsi entrainer un déplacement advectif des molécules de CO_2. Cependant, les variations successives de la pression atmosphérique (ou interne) engendrent des variations différentes des signaux de PCO_2 selon la zone de la cavité et la période de l'année considérée. En effet, les signaux de PCO_2 varient de façon beaucoup plus importantes et abruptes aux points DA, PAS et ABS qu'aux points ST et GM. La diminution de la pression interne dans la cavité provoque une augmentation des teneurs en CO_2 de plus de 150 % dans le DA ou l'ABS. Inversement, une augmentation importante de la pression peut provoquer une diminution de la PCO_2 de la même amplitude dans les mêmes zones. A contrario, ces variations de la pression barométrique entrainent une variation maximale de 100 % dans la ST et la GM. Ces différences de comportement vis-à-vis des variations barométriques dépendraient donc dans un premier temps de la morphologie de la cavité et notamment du volume des différentes salles de la cavité. En effet, dans un grand volume d'air, la variation de pression va provoquer un déplacement advectif moins important que dans un volume d'air plus restreint tel que celui du DA.

A partir du 05/04/2014, les variations barométriques n'ont qu'une infime influence sur les PCO_2 mesurées dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS, alors qu'elles conservent une influence plus importante sur la PCO_2 de la GM. Cette observation ne peut être expliquée par une absence de mouvement advectif du CO_2 mais plutôt par le fait que les phases de compression/décompression n'entrainent pas de concentration différente au niveau du point de mesure. Ceci s'explique par le fait que les concentrations en CO_2 sont similaires dans ces zones de la cavité à cette période.

IV.3.3.1.2 La Grande Diaclase

En 2014, la PCO_2 est enregistrée en un seul et unique point de la Grande Diaclase : au niveau de l'éboulis du Puits du Sorcier (BD PCO_2). La relation entre pression interne et PCO_2 dans cette zone de la cavité a déjà été étudiée par Denis et al. (2005) qui montrent une corrélation importante entre ces deux paramètres en ce point particulier de la cavité. Les auteurs démontrent par la théorie de l'entropie des courbes que cette corrélation n'existe que lorsque les signaux de PCO_2 et pression sont stationnaires, et donc qu'aucun autre facteur ne vient perturber la mesure de PCO_2 au niveau de l'éboulis. L'évolution de ces deux paramètres est présentée pour ce point de mesure pour les six premiers mois de l'année 2014 en Figure IV-13.

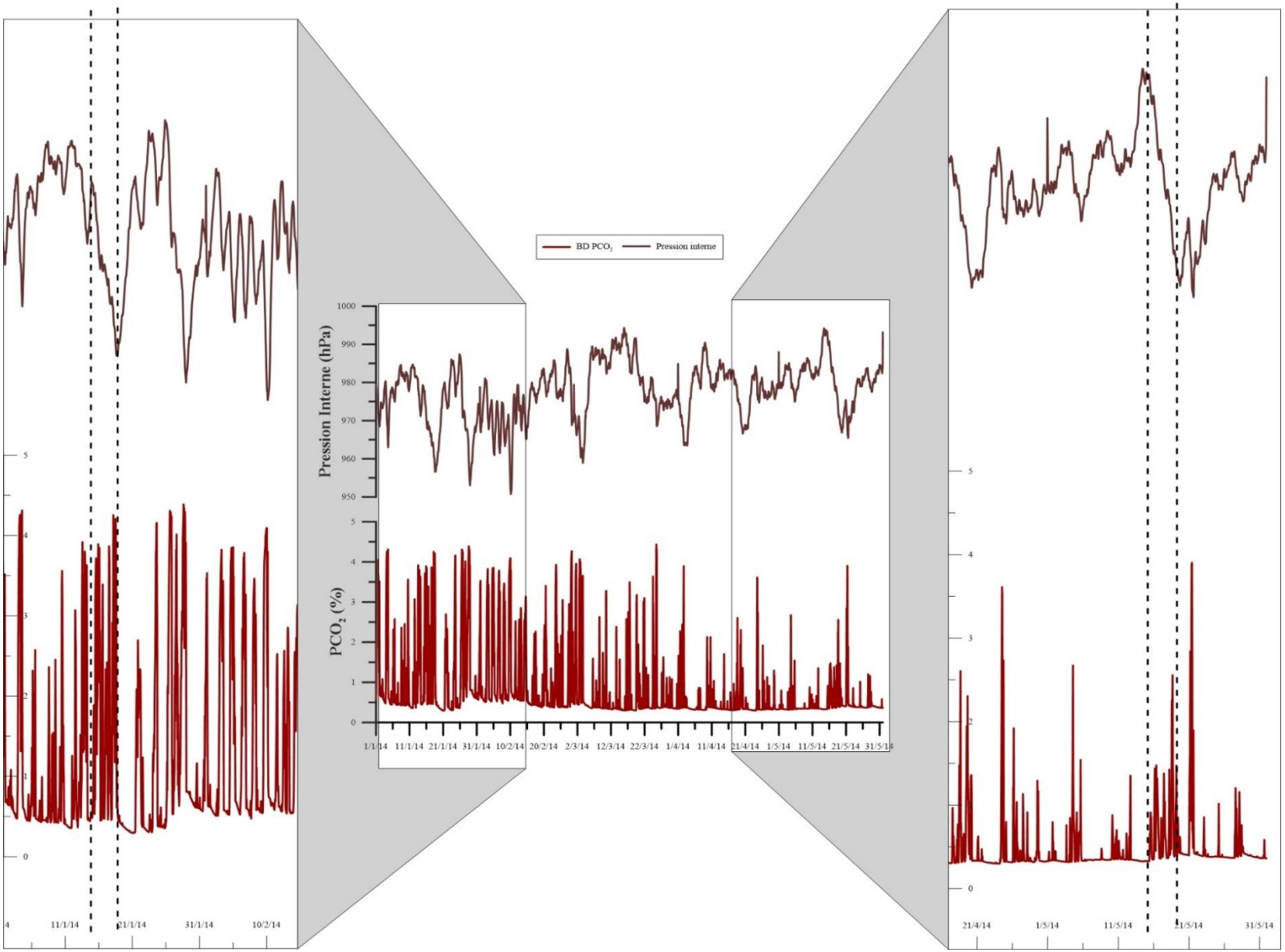


Figure IV-13 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et de la PCO2 mesurée au Bas de la Diaclase du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets montrent signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique.

La comparaison avec l'influence de la pression sur les PCO_2 des deux autres parties de la cavité montrent que cette dernière est beaucoup plus importante en ce point. En effet, les variations barométriques provoquent des pics de CO_2 dont l'amplitude peut atteindre 4 à 5 % sous l'effet combiné de la pression et de l'extracteur d'air présent à moins de 50 cm de ce point de mesure. Ainsi, une hypothèse expliquerait ces pics par des venues d'air enrichi en CO_2 provenant de l'éboulis de manière « naturelle ». Le flux entrant de CO_2 serait alors supérieur à celui que peut éliminer le pompage, d'où l'apparition de pics. En effet, le comportement étant similaire à celui du forage le plus profond dans les formations détritiques, il semble cohérent de penser la source de CO_2 comme une nappe de CO_2 affleurant dans l'éboulis. Celle-ci subirait des phases de compression mais aussi de décompression qui provoquerait ces venues importantes de CO_2.

Parallèlement, l'analyse de l'impact de la pression sur la PCO_2 au point BD permet de dissocier des périodes au cours desquelles l'influence de la pression atmosphérique sur la teneur en CO_2 en ce point de la cavité est plus ou moins importante. En effet, du mois de Janvier au mois d'Avril 2014, la moindre variation de la pression produit une variation brusque du signal de PCO_2. A contrario, à partir du mois d'Avril 2014, les pics de CO_2 sont de moins en moins fréquents et importants alors que les variations de la pression restent présentes. Il semblerait donc que le flux de CO_2 sortant de l'éboulis soit de moindre intensité ou alors qu'un mélange s'opère avec une masse d'air moins chargée en CO_2.

IV.3.3.2 Stratification et homogénéisation des masses d'air par la mise en place de cellules de convections

IV.3.3.2.1 Zone Axiale et Zone droite

Les teneurs en CO_2 de la cavité ne paraissant pas directement impactées par les échanges avec l'atmosphère extérieur, il est entrepris de d'étudier les mécanismes aérologiques internes qui pourraient influencer de manière non négligeable la dynamique du CO_2 dans la cavité. Il est ici notamment question de déterminer quels phénomènes peuvent expliquer la similarité des PCO_2 enregistrées dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS au cours du printemps et de l'été des années 2013 et 2014. Pour cela, les séries temporelles de PCO2 et de température de chaque salle sont présentées pour la période allant du 01/02/2013 au 01/10/2013 en Figure IV-14.

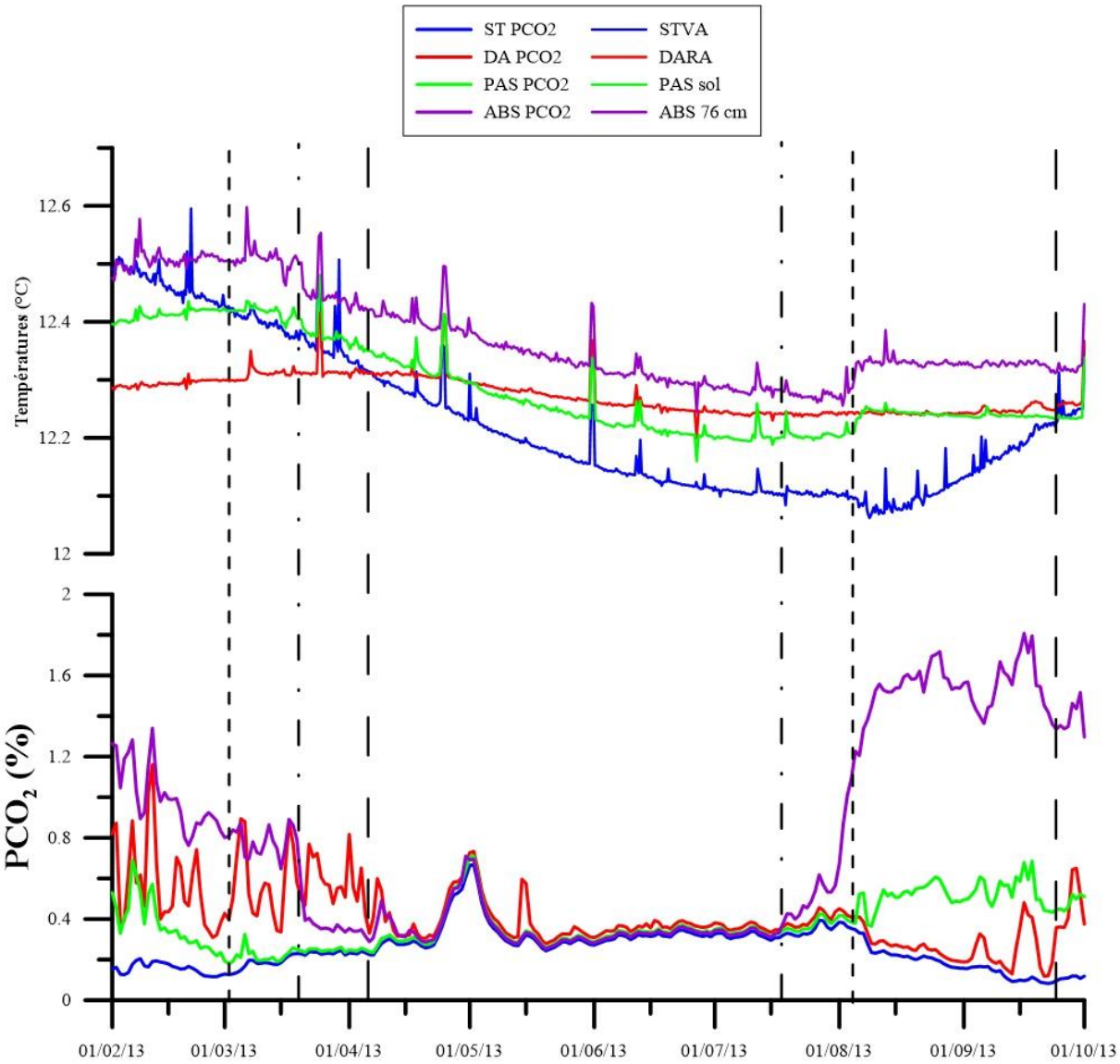


Figure IV-14 : Evolution des températures (haut) et des PCO_2 (bas) dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS du 01/02/2013 au 01/10/2013. Les marqueurs signalent l'homogénéisation successive des différents signaux de PCO_2. L'augmentation soudaine des PCO2 au début du mois de Mai 2013 est causée par un arrêt inopiné du dispositif d'extraction de l'air de la cavité.

Les signaux enregistrés au PAS, à l'ABS mais aussi au DA semblent diminuer l'un après l'autre pour venir se caler à la fin de l'hiver sur le signal enregistré dans la ST. Inversement, à partir de la fin du mois de juillet, ces signaux se dissocient rapidement pour reprendre des valeurs différentes. Pour comprendre ces phénomènes, il est nécessaire de se reporter aux données de température (Figure IV-14).

Tout d'abord, il est observé que la PCO_2 mesurée dans le PAS est la première à diminuer à la mi-février. Cette diminution semble être causée par un brassage de l'air du passage par des cellules de convection qui se mettent en place avec la ST. En effet, la température STVA devient inférieure à celle du PAS sol à cette date. Un air froid descend alors de la salle des taureaux sur

le sol du passage. Les PCO_2 de ces deux zones deviennent alors semblables sous l'effet de ces cellules convectives. Ce système convectif présent dans la ST et le PAS s'étend ensuite à l'ABS 15 jours plus tard comme en témoigne l'homogénéisation de ABS PCO_2 avec les deux autres salles mais aussi la diminution rapide de la température ABS 76 cm qui pointe l'arrivée d'un air plus froid provenant des parties superficielles de la cavité. C'est ensuite la teneur en CO_2 du DA qui devient similaire à celle des autres salles une vingtaine de jours plus tard. Les convections se mettent alors en place avec le DA. Ce processus se produit suite à l'inversion du gradient thermique entre la ST et le DA.

Pour ce qui est de la dissociation des signaux au début du mois d'août, elle se produit dans un premier temps au niveau de l'ABS et du PAS puis au DA. L'arrêt des convections entre la ST et l'ABS et le PAS ne semble pas concorder avec un inversement des températures entre la ST et les zones plus profondes. Cependant, il apparaît que les températures PAS sol et ABS 76 cm augmentent brusquement quand STVA diminue à cette même date. Les cellules de convection sont alors stoppées et la PCO_2 de la ST diminue quand celles du PAS et de l'ABS augmentent. Les convections se poursuivent parallèlement entre la ST et le DA jusqu'à la fin du mois de Septembre 2013 et l'inversion du gradient thermique entre ces deux parties de la cavité.

Cette période de convection est aussi présente en 2014 comme le montre la Figure IV-15.

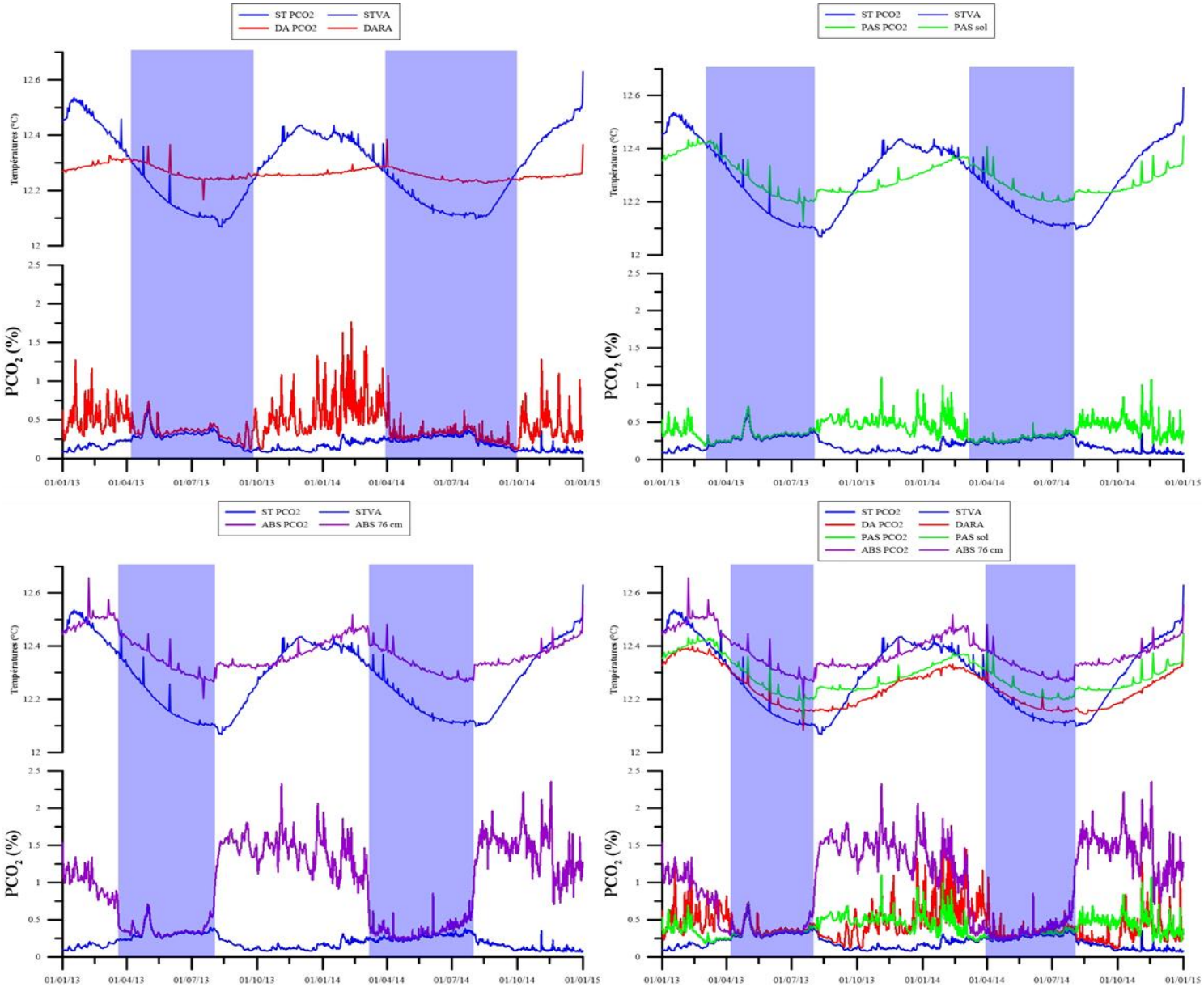


Figure IV-15: Evolution des températures et PCO_2 dans la ST et le DA (en haut à gauche), la ST et le PAS (en haut à droite), la ST et l'ABS (en bas à gauche) et enfin dans les quatre salles (en bas à droite) pour les années 2013 et 2014. Les encadrements bleutés signalent les périodes de convection.

En résumé deux régimes aérologiques différents se succèdent dans ces parties de la cavité :

- Stratification des masses d'air de la fin de l'été jusqu'à la fin de l'hiver qui conditionne la répartition spatio-temporelle du CO_2 qui est alors de plus en plus présent avec la profondeur.
- Homogénéisation des masses d'air par des cellules convectives se mettant en place de façon successive de la ST vers le PAS, l'ABS et le DA. Durant cette période s'étalant d'Avril à Septembre, les teneurs en CO_2 sont les mêmes dans ces différentes salles.

Ces régimes aérologiques sont conditionnés par l'évolution de la température de l'air dans ces différentes salles. Cette dernière est due à la conduction de l'onde thermique extérieure à travers les terrains karstiques sus-jacents. Ainsi, cette onde thermique qu'elle soit froide ou chaude, arrive avec un déphasage temporel selon les profondeurs. Au début du printemps, l'onde froide arrive en premier lieu dans la ST. L'air présent dans la partie la moins profonde est alors plus froid qu'en profondeur, ce qui provoque une déstabilisation des masses d'air stratifiées et la mise en place de cellules convectives.

Pour vérifier la succession de ces deux régimes aérologiques au cours de l'année, des simulations ont été effectuées par Delphine Lacanette à l'aide du simulateur 3D de la cavité de Lascaux. Les résultats des vitesses d'écoulement de l'air dans la cavité le 11/02/2013 et le 31/05/2013 sont visibles pour la ST, le DA, le PAS et l'ABS en **Annexe 8**. Ces derniers sont concordants avec les observations faites à l'aide des données de PCO_2. Ils viennent donc confirmer nos hypothèses.

Qu'en-est-il dans la Grande Diaclase ?

IV.3.3.2.2 La Grande Diaclase

De manière similaire, les températures mesurées à différentes profondeurs dans la Grande Diaclase ainsi que la PCO_2 mesurée au niveau de l'éboulis (BD PCO_2) sont analysées pour les années 2013 et 2014 (Figure IV-16).

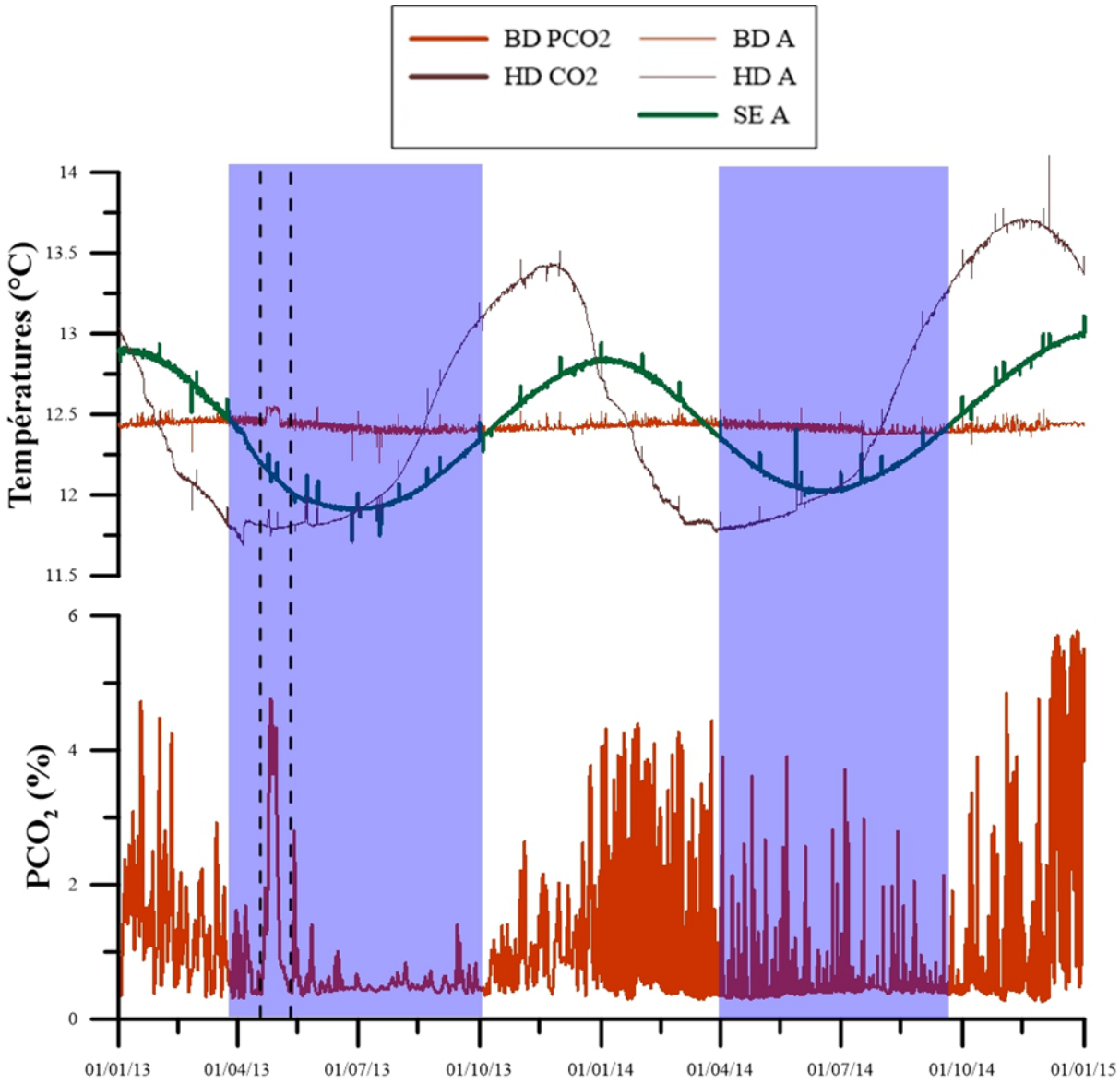


Figure IV-16 : Evolution des températures dans la Grande Diaclase et de la PCO_2 mesurée en Bas de la Diaclase au niveau de l'éboulis au cours de l'année 2014. Les tirets signalent une période d'arrêt inopiné de l'extraction d'air.

Une nouvelle fois, les inversions du gradient thermique entre la partie sommitale de la Diaclase (HD) et Salles Ensablées (SE) et la partie basse (BD) semblent contrôler la mise en place de cellules convectives du mois d'Avril au mois de Septembre aussi bien en 2013 qu'en 2014. Ces cellules de convection homogénéisent alors l'air dans cette zone de la cavité et provoque la diminution de la PCO_2 au niveau de l'éboulis. A contrario, lorsque le gradient thermique est décroissant avec la profondeur, les masses d'air sont individualisées. Les teneurs en CO_2 sont alors plus importantes au niveau de l'éboulis.

IV.3.3.3 Conclusion sur la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux en contexte de pompage

En premier lieu, il a été montré que les échanges entre cavité et atmosphère ne sont pas suffisamment importants pour conduire à des processus de vidange et d'augmentation du CO_2 selon un cycle annuel comme cela a été mis en évidence dans la plupart des cavités de la région comme celle de Cussac. Ce sont les SAS situés à l'entrée de la cavité qui limitent les échanges directs par advection. Cependant, les données isotopiques ($\delta^{13}C$-CO_2) ont montré une participation du CO_2 atmosphérique de plus de 30 % au cours des périodes hivernales dans les parties superficielles de la cavité comme la Salle des Taureaux. Cette observation ajoutée aux contrastes de PCO_2 entre les parties superficielles et profondes de la cavité laisse donc penser que de l'air atmosphérique pénètre dans la cavité tout au long de l'année malgré les SAS. Le pompage qui renouvelle la totalité de l'air de la cavité une fois par jour n'est certainement pas étranger à ce phénomène.

Quoi qu'il en soit, l'évolution des teneurs en CO_2 dans les différentes zones de la cavité ont montré une dynamique particulière principalement influencée par des mécanismes aérologiques internes. Pour illustrer la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la cavité de Lascaux en période de pompage, les moyennes mensuelles des teneurs en CO_2 enregistrées dans les différentes zones de la cavité sont interpolées en deux dimensions par la méthode IDW (Inverse Distance Weight). Les cartes résultant de ces interpolations contraintes par les contours de la cavité de Lascaux sont présentées en Figure IV-17 pour les mois de Février, Mai et Septembre des années 2013 et 2014.

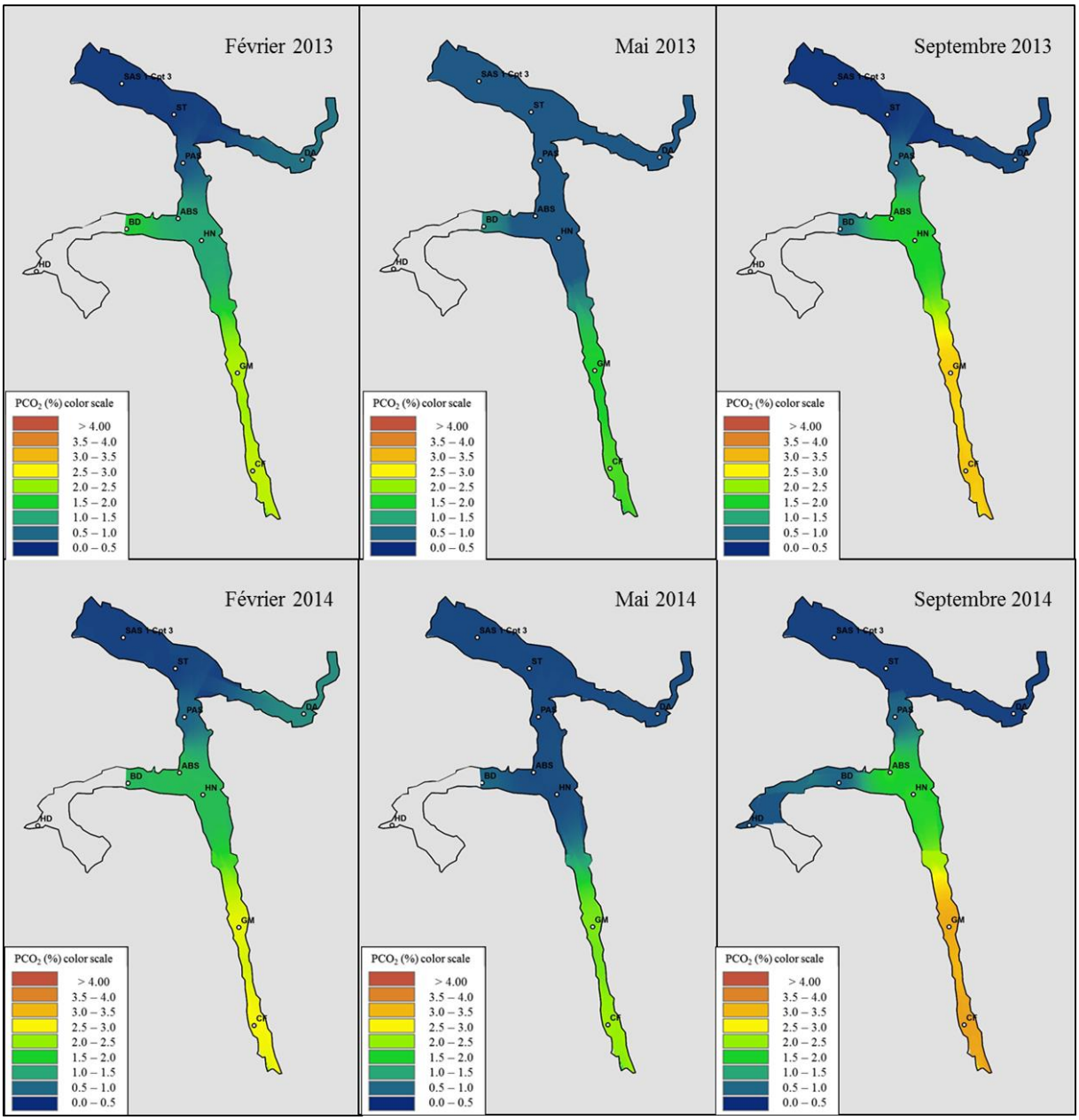


Figure IV-17 : Cartes d'interpolation des PCO_2 dans la cavité de Lascaux en 2013 et 2014.

L'analyse des différentes données à notre disposition ainsi que la connaissance précise de la géomorphologie de la cavité permettent de distinguer des zones plutôt isolées du reste de la cavité telle que la partie profonde de la partie droite (Galerie Mondmilch et Cabinet des Félins). Dans cette partie de la cavité, les PCO_2 sont continuellement élevées et varient de façon cohérente avec celles enregistrées dans l'épikarst. Cette zone de la cavité peut donc être considérée comme impactée par des flux de CO_2 parvenant du massif sus-jacent à travers les fissures et fractures présentes dans cette partie de la cavité et notamment dans le Cabinet des Félins et à la voûte de la Galerie Mondmilch. Les analyses isotopiques de l'air de cette partie de la cavité viennent confirmer cette hypothèse. Elles permettent aussi de penser que les Salles Ensablées se trouvent dans une même configuration (isolement et apports de CO_2 provenant

des parties superficielles du massif). Cependant, le manque de données de CO_2 dans cette zone n'autorise aucune conclusion certaine. Le bas de la Grande Diaclase, certainement la source principale de CO_2 en condition naturelle voit sa dynamique fortement affectée par le pompage de l'air. Toutefois, il a été démontré que des mécanismes convectifs et la pression barométrique semblent contrôler en partie le flux de CO_2 entrant dans la cavité par cette fracture. La Figure IV-18 présente deux schémas conceptuels résumant les différents mécanismes responsables de la dynamique du CO_2 dans cette zone de la cavité.

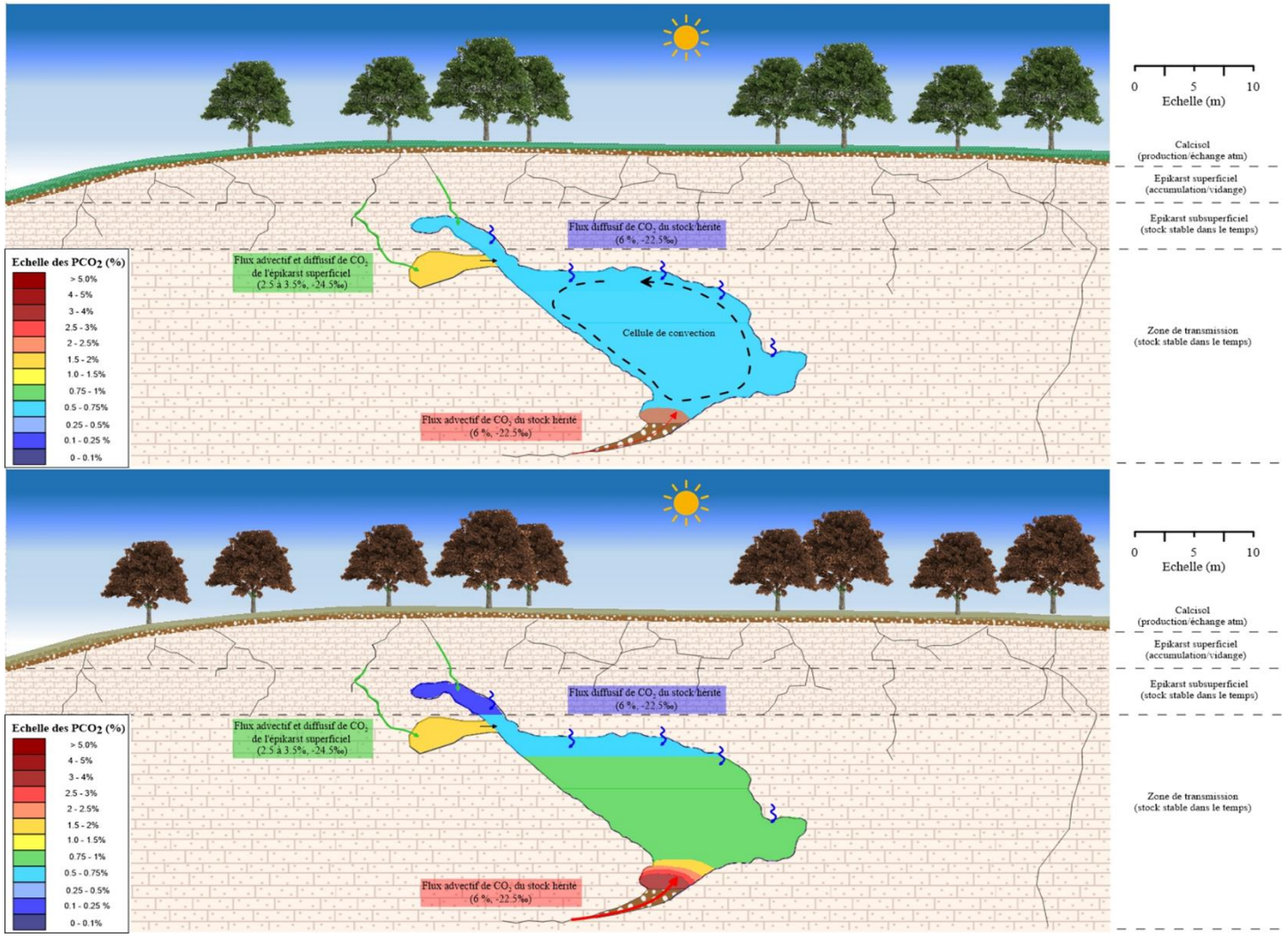


Figure IV-18 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) dans la Grande Diaclase en contexte de pompage. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés.

A contrario, il a été montré de façon claire que le Passage et l'Abside, peuvent être considérées comme des zones d'échanges à travers lesquelles l'air chargé en CO_2 circule en direction des salles superficielles et inversement sous l'effet des variations barométriques. Néanmoins, cette relation entre pression barométrique et PCO_2 n'a pas été retrouvée tout au long de l'année dans la cavité. En effet, il a été observé que deux régimes aérologiques différents s'opèrent au cours de l'année dans ces zones de la cavité et y conditionnent en grande partie la dynamique du CO_2. Ainsi, lorsque la température de l'air est plus élevée dans la Salle des Taureaux, l'air est stratifié et les PCO_2 croissent avec la profondeur. Durant cette période, s'étalant du mois d'Octobre à la fin du mois de Février, la pression barométrique a une influence certaines sur les PCO_2 du fait des mouvements advectifs ascendants ou descendants qu'elle engendre en compressant et en déprimant les masses d'air différenciées. Elle est donc le principal mécanisme de transfert de CO_2, le transfert par diffusion pouvant être négligé.

A l'inverse, lorsque la température de l'air est plus basse dans la Salle des Taureaux que dans les salles plus profondes auxquelles elle est directement connectée, des cellules convectives se mettent en place successivement entre la Salle des Taureaux, le Passage, l'Abside et le Diverticule Axial. Elles ont pour conséquence directe une homogénéisation des concentrations en CO_2 dans ces quatre salles de la cavité et diminue par conséquent l'influence de la pression sur les PCO_2. Ces mouvements convectifs ne semblent pas s'étendre jusque dans les parties plus profondes de la zone droite dans lesquelles des cellules convectives indépendantes avaient été mis en évidence par Lacanette et al. (2012). Cependant, il n'est pas impossible que des échanges de CO_2 se fassent par diffusion entre l'Abside et la Galerie Mondmilch. Les deux schémas conceptuels résumant toutes ces informations sont présentés dans la Figure IV-19.

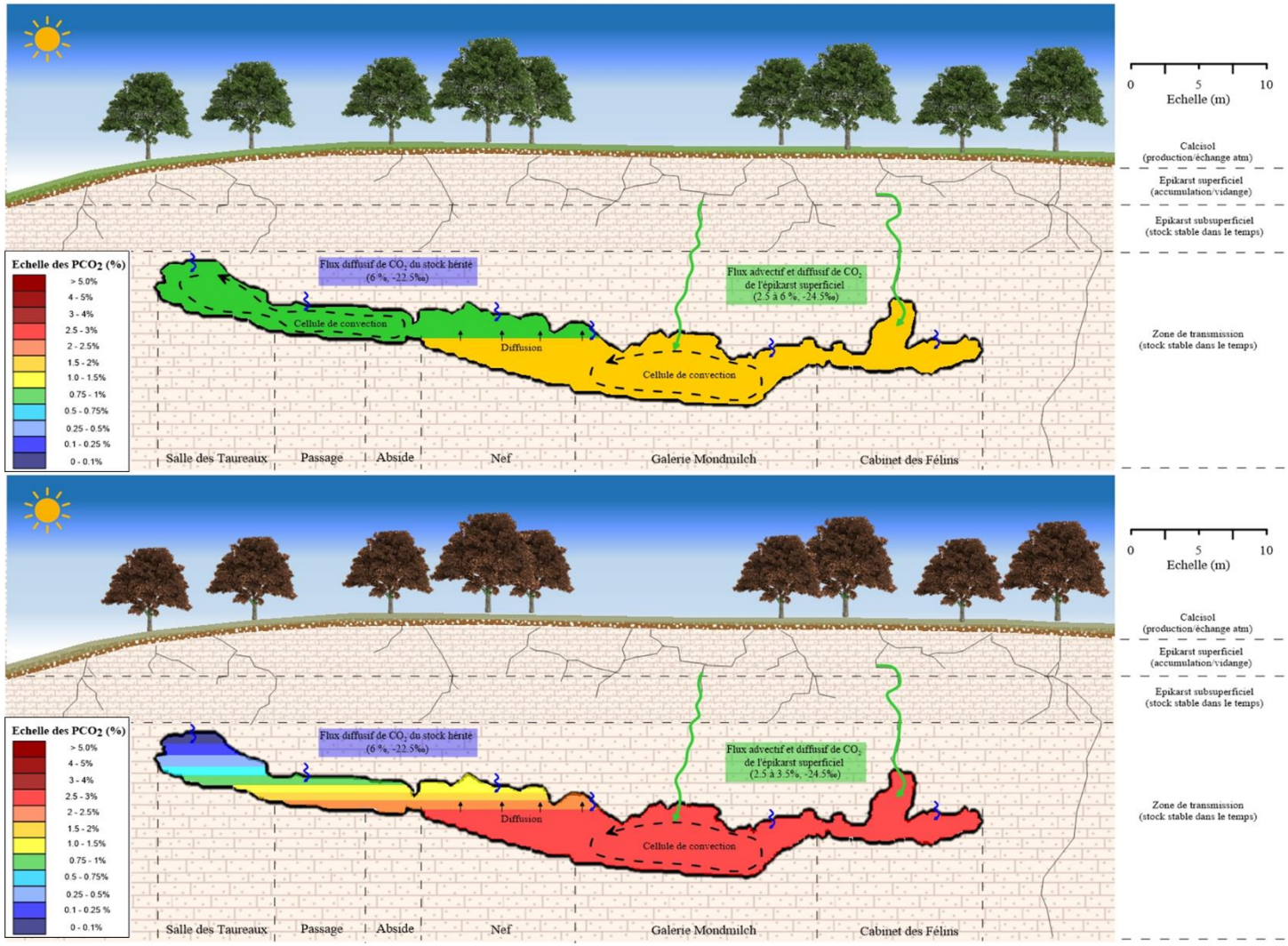


Figure IV-19 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) en contexte de pompage dans la zone droite. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés.

Ces deux mécanismes importants pour la compréhension de la dynamique du CO_2 dans les zones ornées de la cavité sont provoqués par l'onde thermique conduite à travers le massif qui atteint les différentes salles de la cavité avec un déphasage relatif à la profondeur. C'est ce déphasage temporel qui conditionne l'établissement d'un gradient thermique avec la profondeur qui va alors s'inverser selon les périodes de l'année et provoquer ou non la mise en place de mouvements convectifs dans la Grotte de Lascaux.

Cependant, cette dynamique complexe du CO_2 à l'intérieur de la cavité n'est valable que lorsque l'extracteur d'air est en marche. Qu'en est-il en fonctionnement naturel ?

IV.4 La dynamique du CO_2 et l'aérologie dans la cavité en contexte naturel :

Cette troisième partie a pour objectif de présenter les principaux résultats et interprétations relatifs à la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux lorsque l'extracteur d'air est coupé. L'objectif de cet arrêt de l'extracteur est pour rappel de permettre l'identification des potentiels impacts de ce dispositif sur l'aérologie et l'équilibre des eaux aux parois de la cavité.

Ainsi, les séries temporelles acquises aux cours des années 2015 et durant les huit premiers mois de 2016 seront utilisées. Les données de PCO_2 et de $\delta^{13}C$-CO_2 de l'air seront en premier lieu décrites. L'analyse et l'interprétation des différents mécanismes aérologiques responsables la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux seront ensuite détaillées.

IV.4.1 Les données disponibles

IV.4.1.1 Les teneurs en CO_2

Les PCO_2 enregistrées du 1 Janvier 2015 au 01/09/2016 dans 9 zones différentes seront utilisées au cours de cette partie. Le Tableau IV-6 présente les statistiques descriptives des différentes séries temporelles de PCO_2 à notre disposition, calculées pour les années 2015 et 2016.

Tableau IV-6 : Description statistique des différentes PCO_2 mesurées dans la cavité en 2015 et 2016. Le capteur de PCO_2 au point ABS 136 cm est tombé en panne au début de l'année 2016.

Localisation	2015			2016		
	Moyenne (%)	**Ecart type (%)**	**Coefficient de variation (%)**	**Moyenne (%)**	**Ecart type (%)**	**Coefficient de variation (%)**
ST CO_2	1.70	0.42	25%	1.82	0.33	18%
DA CO_2	2.03	0.47	23%	2.28	0.34	15%
PAS CO_2	2.17	0.55	25%	2.34	0.43	19%
NEF CO_2	2.31	0.54	23%	2.42	0.46	19%
GM CO_2	2.82	0.38	13%	2.80	0.20	7%
CF CO_2	2.91	0.35	12%	2.86	0.25	9%
BD CO_2	3.85	1.03	27%	4.10	0.84	20%
HD CO_2	2.45	0.52	21%	2.60	0.95	37%
SE CO_2	2.93	0.45	15%	2.96	0.22	7%

Les valeurs obtenues permettent de construire l'histogramme (Figure IV-20) représentant les moyennes annuelles des différentes séries temporelles de PCO_2 mesurées dans la cavité en 2015 et 2016.

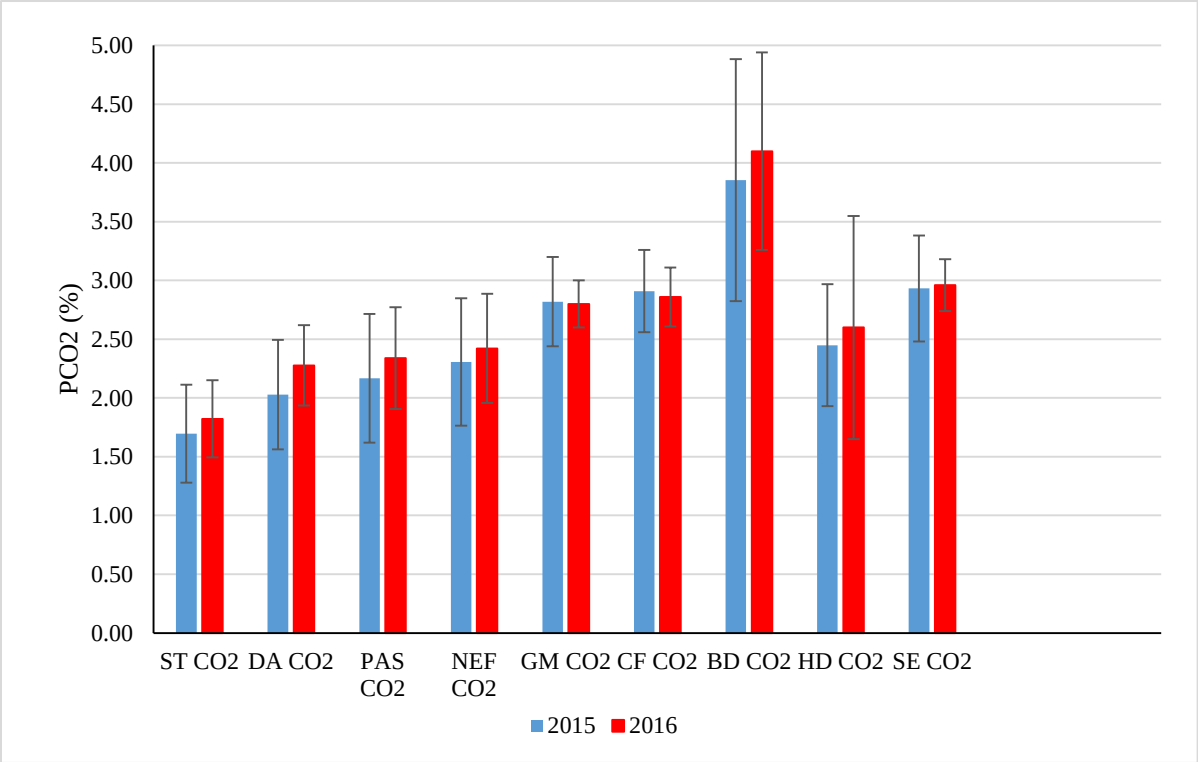


Figure IV-20 : Comparaison des moyennes annuelles de PCO_2 enregistrés avec les 11 capteurs de CO_2 présents dans la cavité pour les années 2015 et 2016.

Une première observation de ces données montre une augmentation conséquente des PCO2 dans toutes les zones de la cavité avec néanmoins des différences selon les zones de la cavité. En effet, l'augmentation la plus significative est localisée dans les zones superficielles (ST, DA et PAS) mais aussi au niveau de la Grande Diaclase au point de mesure BD. A contrario, l'évolution des PCO_2 est moins importante pour les points ABS, GM et CF qui été sûrement moins affectés par le pompage de l'air de la cavité.

De plus, bien qu'il ne soit pas cohérent de comparer les deux années d'enregistrement entre elles du fait du manque de données pour les quatre derniers mois de l'année 2016 il est possible de comparer chaque point de mesure entre eux. Les teneurs en CO_2 sont assez similaires pour tous les points de mesure, bien qu'il soit encore possible de distinguer trois groupes :

- ST, DA, PAS et NEF, qui présentent les PCO_2 les plus faibles comprises entre 1.7 % et 2.4 %,
- GM, CF, HD et SE qui représentent les zones de la cavité dans lesquelles les PCO2 sont moyennes (entre 2.5 et 2.9 %),
- BD, le point de mesure ou la moyenne annuelle de la PCO2 est la plus importante (entre 3.85 et 4.1 %).

Les coefficients de variation pour l'année 2015 (les seuls considérés) montrent une variabilité importante au point de mesure le plus profond : BD (27 %). A contrario, dans tous les autres points de mesure présentent une variabilité inversement corrélée avec la profondeur (Cv ST > Cv Da > Cv PAS > Cv ABS > Cv GM > Cv CF). Le point de mesure SE montre une variabilité similaire à celle de GM et CF qui sont pourtant localisés 10 m plus en profondeur dans la cavité. L'isolement des Salles Ensablées par rapport au restant de la cavité peut donc expliquer que la PCO_2 y soit plus importante et moins variante. Pour analyser plus précisément cette variabilité, la Figure IV-21 présente l'évolution des moyennes mensuelles des différentes PCO_2 mesurées dans la cavité du mois de Février 2015 au mois d'Août 2016.

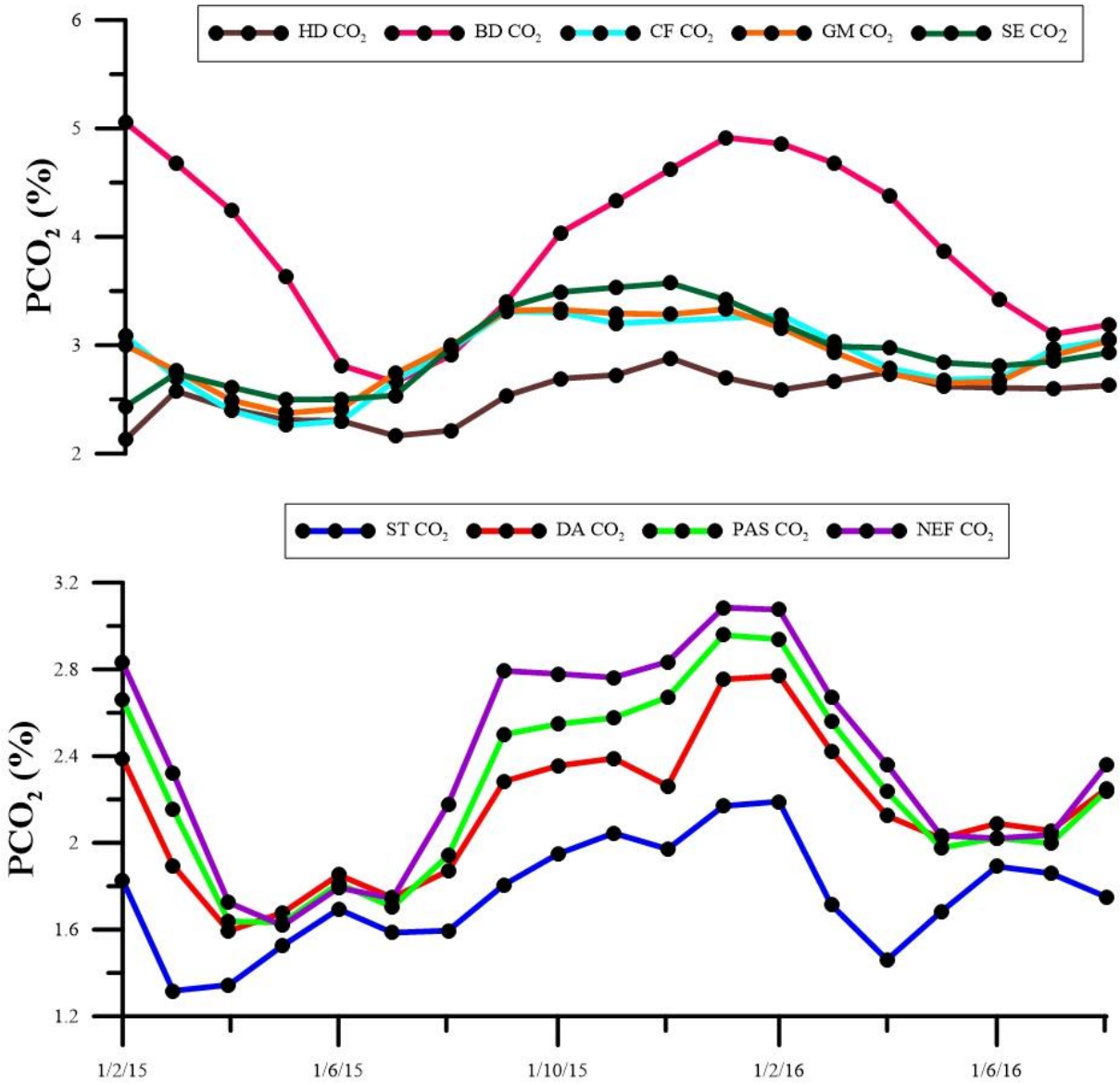


Figure IV-21 : Evolution des moyennes mensuelles de PCO2 aux différents points de mesure de Février 2015 à Août 2016.

Les teneurs en CO_2 moyennes mensuelles présentent une évolution sinusoïdale similaire aux points GM, CF, SE et BD avec toutefois des PCO_2 presque deux fois supérieures en périodes de forte concentration au niveau du point BD. Une phase de lente diminution est observée pour ces 4 points de Février à Juin 2015 suivie d'une phase d'augmentation progressive de Juillet 2015 à Janvier 2016. Les concentrations en CO_2 diminuent ensuite jusqu'au mois de Juin 2016 pour ensuite augmenter à nouveau en Août 2016. Les teneurs en CO_2 aux points GM, CF et SE semblent varier de façon similaire à celles relevées dans les forages profonds de la parcelle expérimentale. Les teneurs en CO_2 plus importantes au point BD témoignent elles aussi d'un marquage de l'épikarst profond avec des valeurs et une évolution similaire.

Dans les zones moins profondes de la cavité (ST, DA, PAS et NEF), les PCO_2 évoluent différemment avec deux périodes distinctes qui se répètent en 2015 et 2016. De février 2015 à Mai 2015, les teneurs en CO_2 moyennes sont différentes avec une augmentation selon la profondeur du point de mesure (ST PCO_2 < DA PCO_2 < PAS PCO_2 < NEF PCO_2). Les PCO_2 moyennes deviennent alors similaires (1.6 à 1.8 %) de Mai à Juillet 2015 et de Mai à Juillet 2016. Au cours de ces deux périodes, la teneur en CO_2 moyenne augmente donc au point ST et diminue aux points de mesure situés plus en profondeur (DA, PAS et NEF). Ces teneurs augmentent ensuite lors de la dissociation des signaux au mois d'Août dans les zones profondes et diminuent au point ST. Ainsi, les teneurs en CO_2 sont plus importantes en hiver et en automne aux points PAS, DA et NEF comme c'était déjà le cas avant l'arrêt de l'extracteur.

Ainsi, plusieurs évolutions différentes sont enregistrées dans les différentes parties de la cavité de Lascaux. Il est donc probable comme en contexte de pompage que plusieurs mécanismes expliquent cette répartition spatio-temporelle des PCO_2. L'observation des séries temporelles brutes de PCO_2 enregistrées au cours des années 2015 et 2016 (Figure IV-22) vient appuyer ces hypothèses.

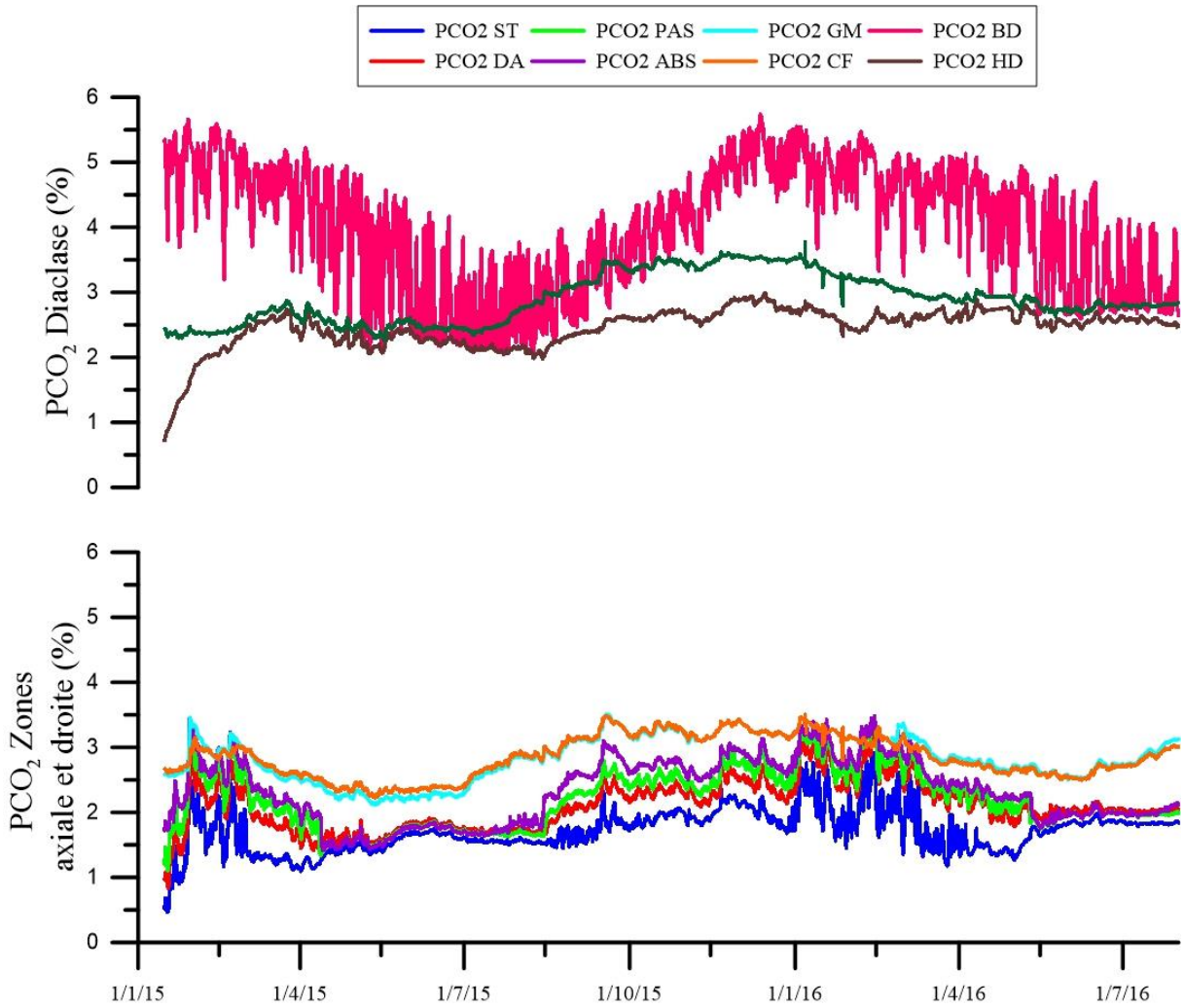


Figure IV-22 : Evolution des PCO_2 brutes aux différents points de mesure de la cavité de Février 2015 à Août 2016.

IV.4.1.2 Les données isotopiques :

Parallèlement, trois campagnes de prélèvements d'air ont permis d'analyser le signal isotopique du CO_2 ($\delta^{13}C$-CO_2) dans différentes zones stratégiques de la cavité choisies selon les teneurs en CO_2 et leur évolution au cours de l'année. Ainsi, 7 prélèvements (ST, DA, ABS, GM, BD, HD et SE) pour chaque campagne. Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau IV-7.

Tableau IV-7: Récapitulatif des résultats d'analyse du $\delta^{13}C$-CO_2 effectuées sur les prélèvements des trois campagnes de 2015 et 2016. Le signal isotopique du CO_2 atmosphérique est tiré des mesures du NOAA (ESRL Global Monitoring année 2016, les mesures sont effectuées sur le site Mace Head, Irlande).

Date prélèvement	Localisation	δ13C-CO2 (‰)
24/02/2015	ATM	-9.6
	ST	-22.8
	DA	-22.7
	ABS	-23.1
	GM	-23.7
	BD	-22.8
	HD	-22.9
	SE	-23.0
04/05/2015	ATM	-9.6
	ST	-22.8
	DA	-22.7
	ABS	-22.2
	GM	-23.6
	BD	-22.2
	HD	-23.0
	SE	-22.8
23/02/2016	ATM	-9.6
	ST	-22.3
	DA	-22.1
	ABS	-22.3
	GM	-22.4
	BD	-22.1
	HD	-22.8
	SE	-22.6

Ces valeurs confirment la présence d'un CO_2 d'origine biogénique. Les valeurs les plus appauvries sont mesurées au cours des deux premières campagnes au point GM (-23.7 et -23.6 ‰). Les autres mesures montrent des valeurs qui ne sont pas significativement différentes au cours des trois campagnes de mesure (entre -22.0 et -23.0 ‰). Une interprétation plus précise sera donnée à ces mesures au cours de cette partie et notamment lors de l'interprétation des échanges entre cavité et atmosphère. Néanmoins, les valeurs paraissent globalement plus enrichies en ^{13}C qu'en contexte de pompage.

IV.4.1.2.1 Les données de température de l'air et de la roche

Les moyennes annuelles de chaque point de mesure dans l'air de la cavité sont présentées pour l'année 2015. Ne disposant pas des enregistrements complets de l'année 2016, il est entreprit de comparer les sept premiers mois des années 2015 et 2016.

Tableau IV-8 : Moyennes annuelles des températures de l'air mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2015 et 2016. La différence entre l'année 2015 et l'année 2016 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert).

Moyennes Annuelles	2015	2015 (au 1/08)	2016 (au 1/08)	Différence 2015-2016
STPGA	12.622	12.557	12.711	-0.153
STPDA	12.605	12.560	12.712	-0.152
STGOA	12.562	12.516	12.684	-0.168
STVA	12.645	12.567	12.722	-0.155
DAEA	12.543	12.526	12.666	-0.140
DARA	12.545	12.525	12.660	-0.136
DAFA	12.518	12.511	12.592	-0.081
DAMA	12.392	12.384	12.430	-0.047
PAS sol	12.581	12.580	12.710	-0.130
PAS milieu	12.608	12.622	12.738	-0.116
PAS voute	12.611	12.628	12.746	-0.118
PASPDA	12.611	12.629	12.745	-0.116
PASPGA	12.577	12.581	12.708	-0.127
ABS PMA	12.681	12.699	12.799	-0.101
ABS 0.05	12.725	12.719	12.834	-0.115
ABS 96	12.685	12.686	12.800	-0.114
ABS 326	12.679	12.696	12.808	-0.112
NEFA	12.621	12.622	12.709	-0.087
GMA	12.627	12.619	12.677	-0.057
CF fond	12.616	12.620	12.687	-0.067
PSA	12.613	12.612	12.697	-0.085
BDA	12.677	12.671	12.811	-0.140
HDA	13.019	12.536	12.579	-0.043
SEA	12.833	12.732	12.830	-0.098

Les valeurs moyennes évoluent pour l'année 2015 de 12.392 à 13.019 °C. Comme en contexte de pompage, les températures annuelles moyennes de l'air les plus chaudes sont observées dans les zones éloignées de l'entrée de la cavité (partie profonde de la zone droite et Grande Diaclase) avec une valeur la plus élevée en HDA. Le point froid est toujours présent dans en DAMA. Néanmoins, les valeurs moyennes sont globalement plus élevées qu'en 2013 et 2014. La comparaison entre les sept premiers mois de 2015 et 2016 soulignent une augmentation claire (jusqu'à 0.168 °C) de la température de l'air dans la cavité en 2016.

L'évolution de ce paramètre dans les différentes salles de la Grotte de Lascaux est quant à elle présentée en Figure IV-23. L'observation des différentes courbes montre une variabilité sinusoïdale de la température de l'air dans la cavité de période un an comme en contexte de

pompage. Cette variabilité est une nouvelle fois plus importante dans les zones moins profondes (HDA, SEA et ST) et à l'inverse plus faible dans les zones profondes (GMA, PSA et BDA). Un déphasage temporel est encore une fois observé. Il évolue de 3 à 4 mois selon les différences de profondeur. Ainsi, la température de l'air de la Grotte de Lascaux est encore une fois conditionnée par l'onde thermique externe conduite à travers le massif sus-jacent.

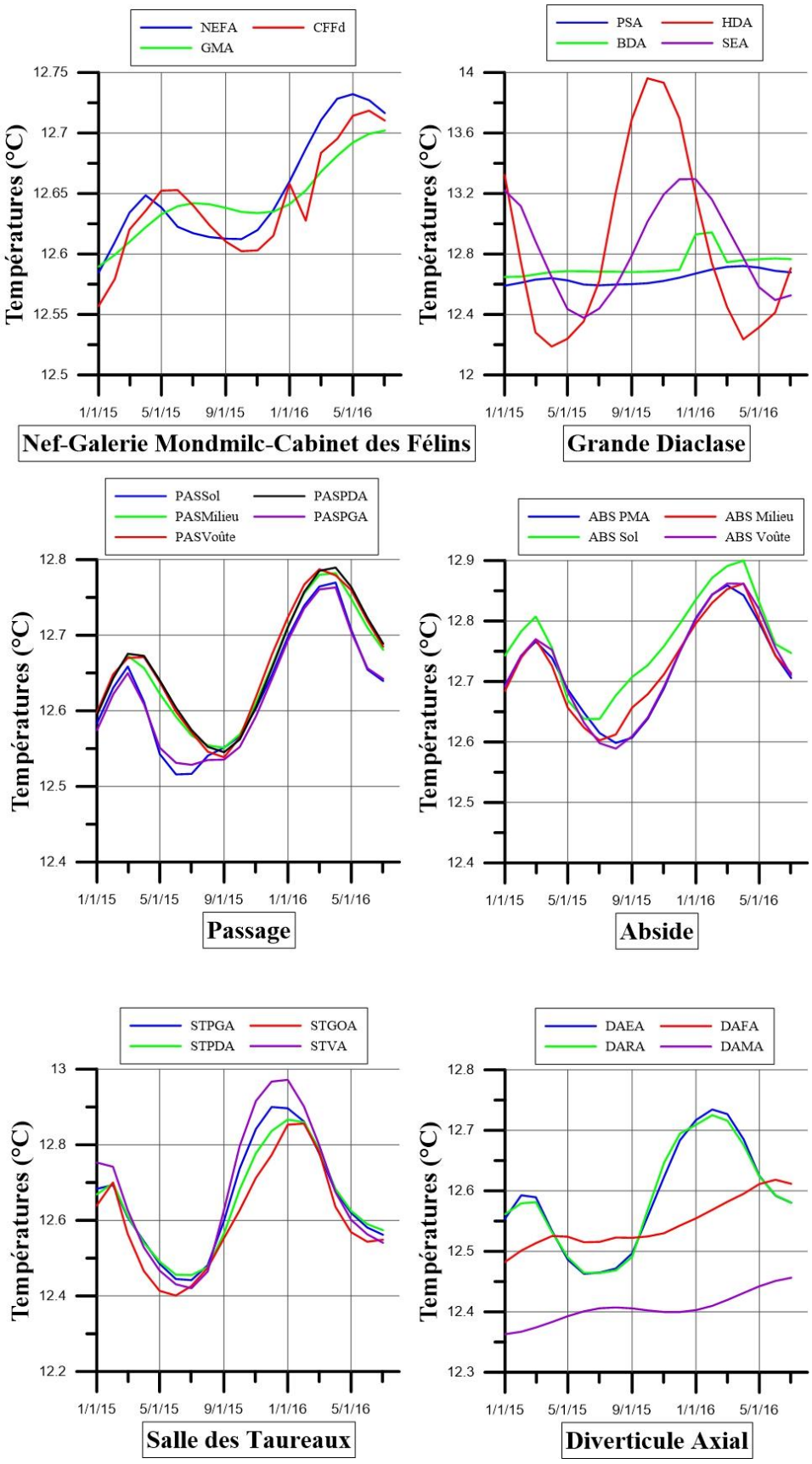


Figure IV-23 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2015 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase.

Les valeurs annuelles moyennes de la température de la roche (Tableau IV-9) ainsi que l'évolution temporelle de ce paramètre dans les différentes zones de la cavité (Figure IV-24) témoignent d'une tendance similaire.

Tableau IV-9 : Moyennes annuelles des températures de la roche mesurées dans les différentes salles de la cavité de Lascaux pour les années 2015 et 2016. La différence entre l'année 2015 et l'année 2016 est aussi présentée pour chaque point de mesure. L'échelle des couleurs présente pour chaque année les points de la cavité les plus chauds (en rouge) et les plus froids en moyenne (en vert).

Moyennes Annuelles	2015	2015 (au 1/08)	2016 (au 1/08)	Différence 2015-2016
STPGR	12.595	12.552	12.706	-0.155
STPDR	12.603	12.571	12.722	-0.152
STGOR	12.577	12.534	12.695	-0.161
STVR	12.650	12.573	12.733	-0.159
DAER	12.541	12.528	12.663	-0.135
DARR	12.543	12.527	12.660	-0.134
DAFR	12.519	12.513	12.592	-0.080
DAMR	12.400	12.392	12.438	-0.046
PASPDR	12.605	12.626	12.742	-0.116
PASPGR	12.579	12.586	12.709	-0.123
ABS PMR	12.678	12.696	12.803	-0.107
NEFR	12.611	12.612	12.693	-0.081
GMR	12.627	12.620	12.677	-0.057
PSR	12.612	12.613	12.696	-0.082
BDR	12.680	12.673	12.720	-0.047

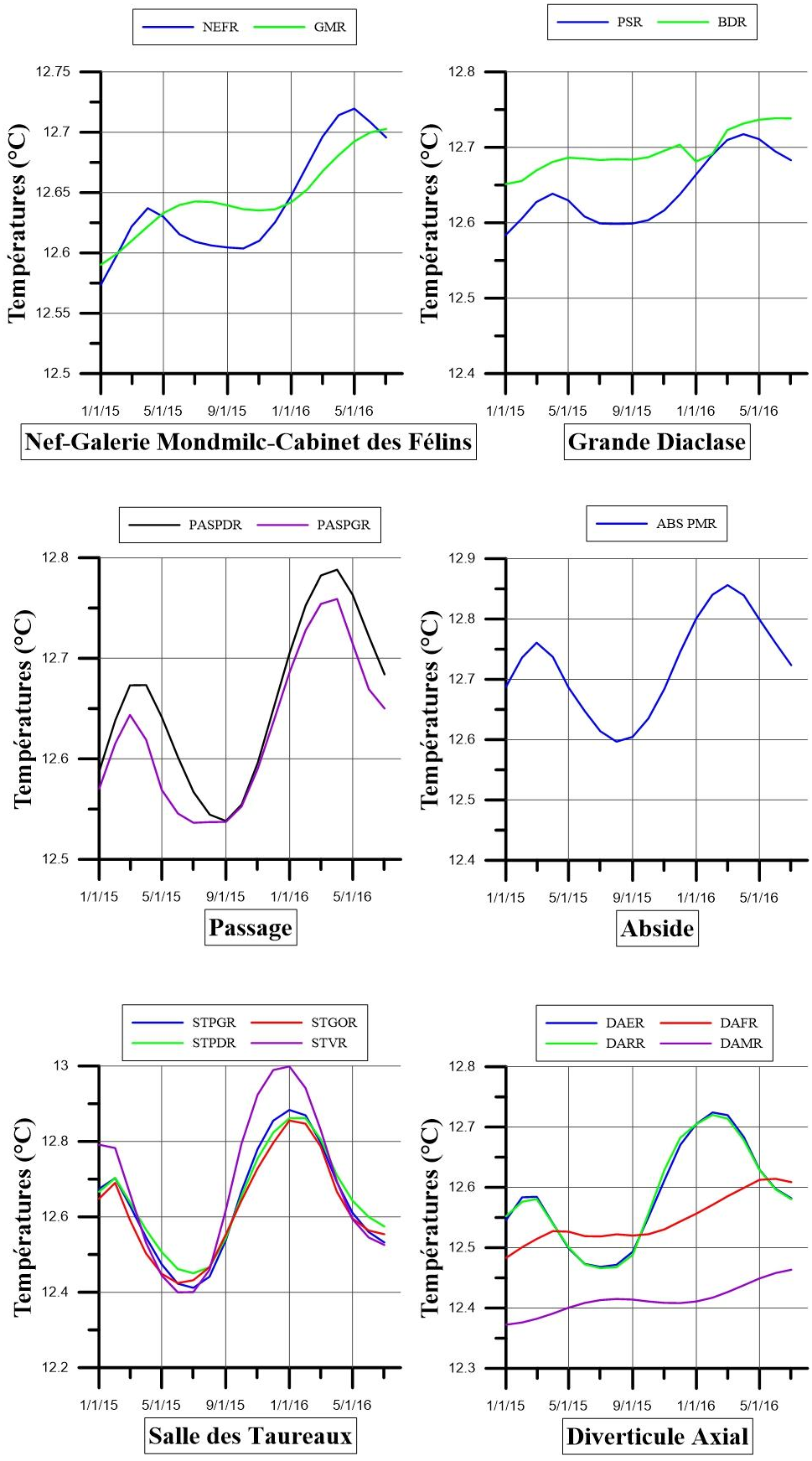


Figure IV-24 : Evolution des températures moyennes mensuelles de la roche de Janvier 2015 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase.

IV.4.2 Echanges entre atmosphère et cavité

Comme précédemment, les échanges entre atmosphère et cavité sont interprétés à l'aide des différences de masse volumique entre ces deux masses d'air mais aussi à travers l'interprétation du signal isotopique du $\delta^{13}C\text{-}CO_2$.

IV.4.2.1 Etude des différences de masse volumique entre atmosphère et cavité sans pompage

Comme pour les années précédentes en pompage, la Figure IV-25 présente du 01/02/2015 au 01/02/2016, l'évolution de la différence entre la masse volumique de l'atmosphère et celui de la cavité avec en parallèle la PCO_2 mesurée dans la Salle des Taureaux. Les données d'entrée du calcul des masses volumiques sont similaires à celles considérées en période de pompage.

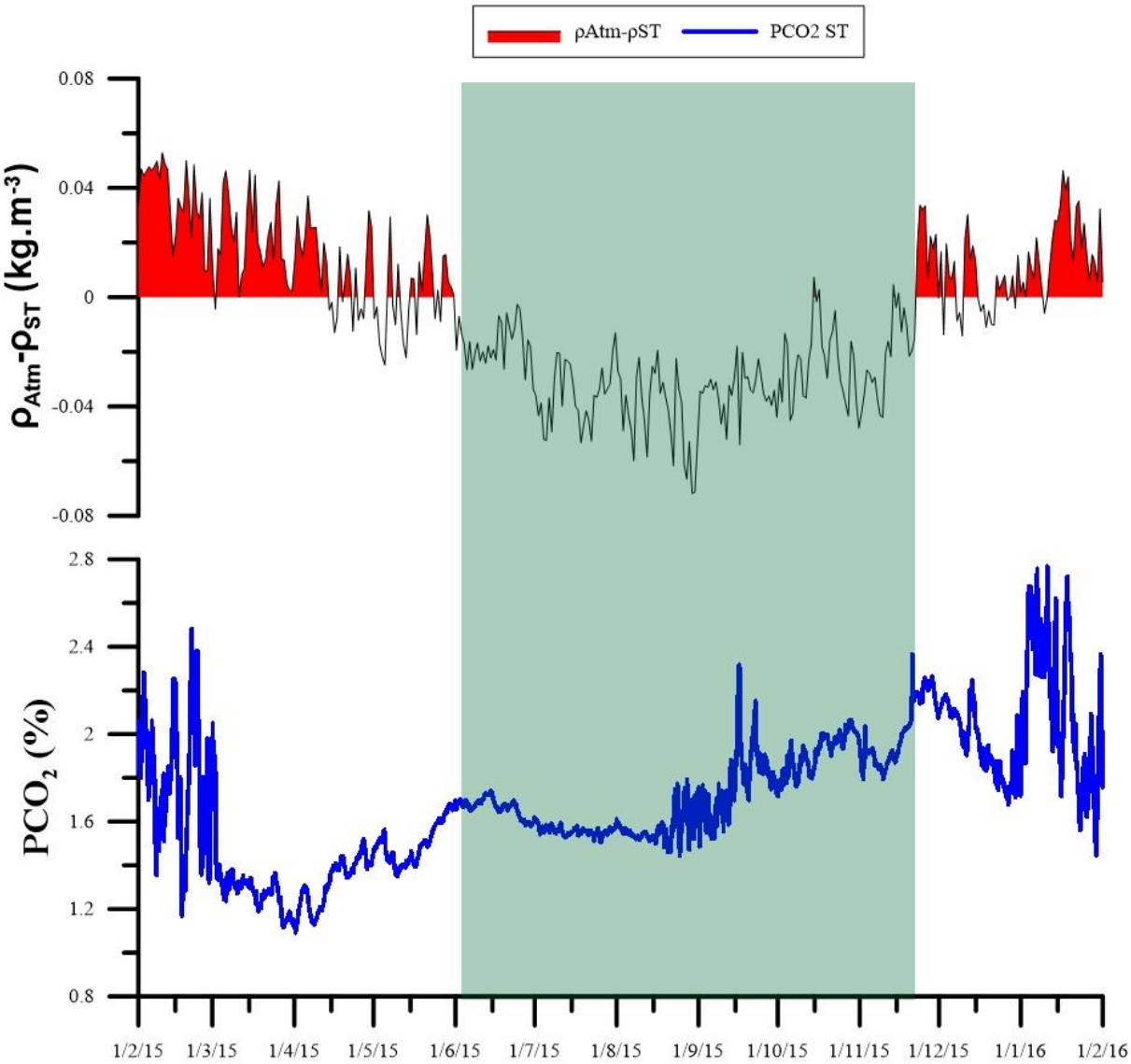


Figure IV-25 : Evolution de la différence entre la masse volumique de l'air atmosphérique extérieure et de l'air de la Salle des Taureaux de Févier 2015 à Février 2016. Le remplissage rouge signale les périodes au cours desquelles la masse volumique est supérieure pour l'air atmosphérique extérieure et peut donc permettre la ventilation de la cavité de Lascaux. L'évolution de la teneur en CO_2 dans la Salle des Taureaux est aussi présentée.

Les périodes propices au processus de ventilation de l'air de la cavité (rouge) sont rencontrées à Lascaux du mois de Février 2015 au mois de Mai 2016, mais aussi à partir de la mi-Novembre 2015. Entre ces deux périodes, l'air atmosphérique est plus léger du fait des températures plus importantes de la fin du printemps jusqu'au milieu de l'automne. Les importantes teneurs en CO_2 dans la cavité augmentent ce différentiel.

Cependant, comme en période de pompage, l'évolution de la teneur en CO_2 mesurée dans la Salle des Taureaux ne paraît pas être influencée directement par de potentielles arrivées d'air atmosphérique moins chargée en CO_2. Cette observation souligne encore une fois le rôle prépondérant du SAS 1 de la cavité qui diminue considérablement les courants d'air entrant

dans la cavité en période hivernale. Cet aménagement est donc responsable en partie de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la cavité.

Cependant, cette observation ne signifie pas un absence d'échanges entre cavité et atmosphère. En effet, les teneurs en CO_2 moyennes annuelles pour l'année 2015 augmentent à mesure que la profondeur augmente, soulignant de possibles échanges entre la cavité et l'atmosphère (Figure IV-26).

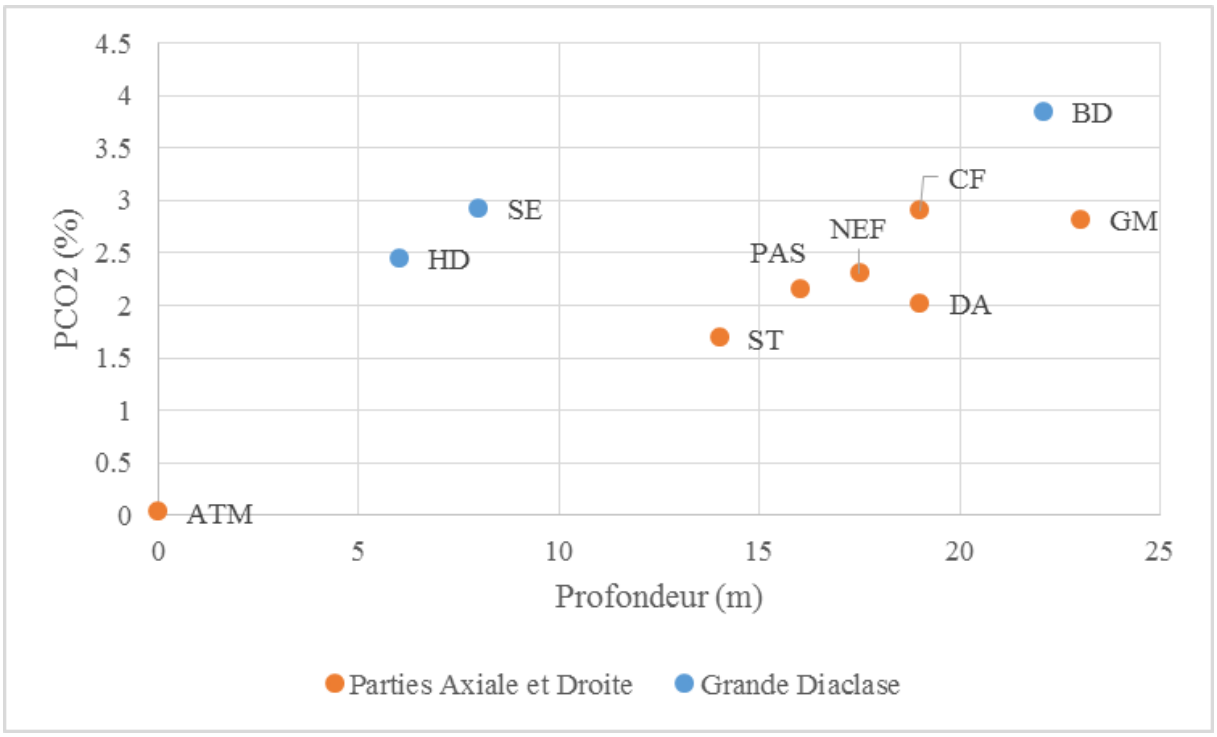


Figure IV-26 : Relation entre profondeur et PCO_2 moyennes des différents points de mesure dans la cavité pour l'année 2015. Les parties axiale et droite sont présentées séparément de la Grande Diaclase.

IV.4.2.2 Le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 dans la cavité de Lascaux sans pompage

Les trois campagnes réalisées en période d'arrêt du pompage apportent des informations importantes quant aux entrées de CO_2 atmosphérique dans la cavité. Les 21 échantillons sont présentés dans le repère de Keeling ($\delta^{13}C$-CO_2 = f(1/PCO_2)) en Figure IV-27, d'abord par campagne de prélèvement puis toute campagne confondue. Une échelle logarithmique est choisie pour permettre la visualisation de tous les échantillons.

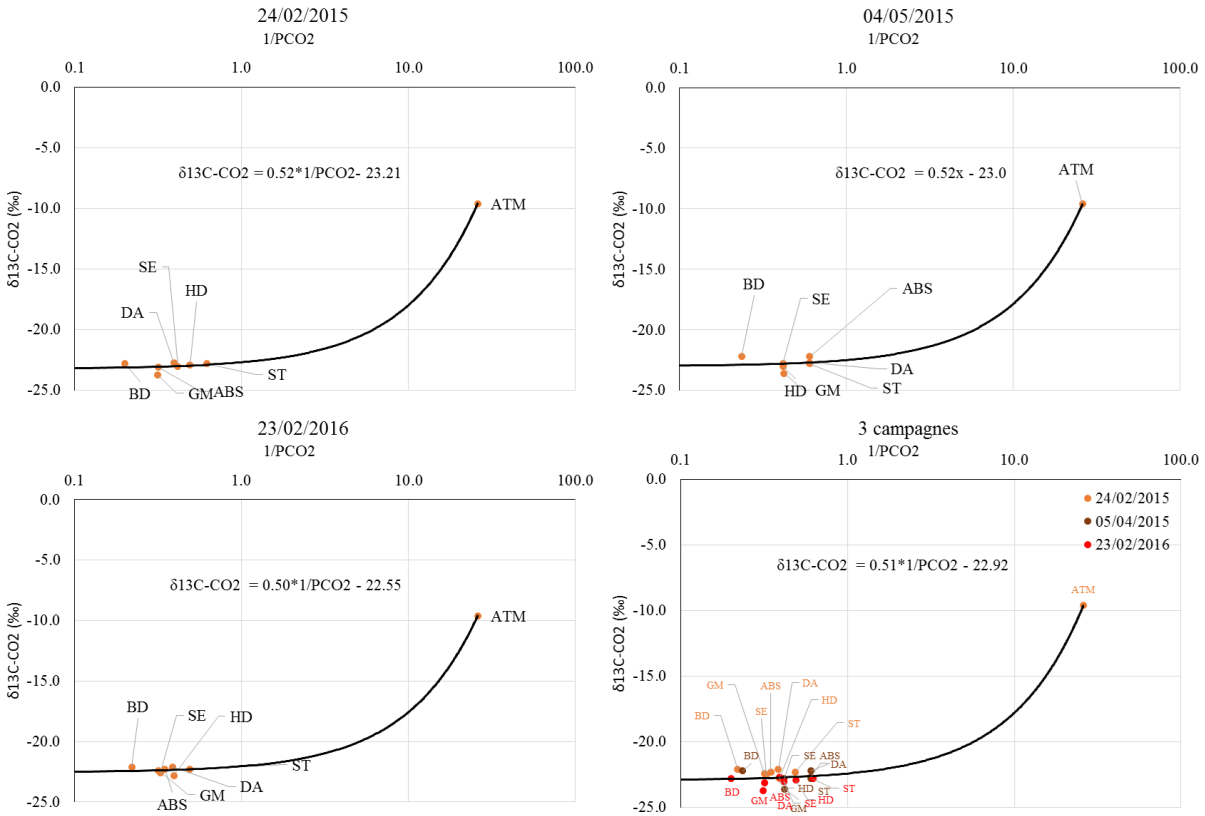


Figure IV-27 : Représentation des 21 échantillons de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ dans le repère de Keeling pour les campagnes de prélèvements du 24/02/2015 en haut à gauche, du 04/05/2015 en haut à droite, du 23/02/2016 en bas à gauche et enfin pour toute campagne confondue en bas à droite.

Les trois campagnes de mesure montrent des valeurs de $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ quasi-similaires pour les différentes zones de la cavité avec des valeurs comprises entre -22.1 ‰ et -23.7 ‰, malgré des teneurs en CO_2 différentes. Cette faible variabilité de la composition isotopique du CO_2 témoigne d'une certaine homogénéité des proportions de CO_2 atmosphérique et du membre léger. Les résultats des calculs des proportions de chacun des deux pôles sont présentés dans le Tableau IV-10. Le $\delta^{13}C\text{-}CO_2$ du membre léger considéré est fixé à -26.7 ‰ comme lors des calculs de F en période de pompage.

Tableau IV-10 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et membre léger).

Date prélèvement	Localisation	δ13C-CO2 (‰)	% Atmosphère (F)	% Léger (1-F)
24/02/2015	ST	-22.8	24%	76%
	DA	-22.7	25%	75%
	ABS	-23.1	22%	78%
	GM	-23.7	19%	81%
	BD	-22.8	24%	76%
	HD	-22.9	24%	76%

	SE	-23.0	23%	77%
04/05/2015	ST	-22.8	24%	76%
	DA	-22.7	25%	75%
	ABS	-22.2	28%	72%
	GM	-23.6	20%	80%
	BD	-22.2	28%	72%
	HD	-23.0	23%	77%
	SE	-22.8	24%	76%
23/02/2016	ST	-22.3	27%	73%
	DA	-22.1	28%	72%
	ABS	-22.3	27%	73%
	GM	-22.4	26%	74%
	BD	-22.1	28%	72%
	HD	-22.8	24%	76%
	SE	-22.6	25%	75%

Au cours des trois campagnes de mesure, selon l'approche de Spötl et al. (2005), la proportion de CO_2 atmosphérique dans la totalité du CO_2 de l'air de la cavité ne varient que très peu avec des valeurs comprises entre 19 et 28%. Les proportions de CO_2 atmosphérique les moins importantes sont relevées au point GM.

La comparaison avec les valeurs de F calculées en période de pompage montre clairement une participation plus importante du pôle atmosphère et donc des échanges potentiellement plus importants entre la cavité et l'air extérieur lorsque le pompage est arrêté. Cependant, cette observation est en contradiction totale avec le fait que les PCO_2 soient beaucoup plus élevées en période d'arrêt du pompage. En effet, il est impossible d'augmenter la teneur en CO_2 dans la cavité par l'introduction d'air atmosphérique beaucoup moins concentrée en CO_2 (0.04 %).

Les calculs sont donc réitérés avec un membre léger plus enrichi en ^{13}C dont la valeur est fixée en considérant celles relevées dans les forages FC1, FC2 et FC3. Le $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger est alors fixé à -24.5 ‰. Les résultats sont présentés dans le Tableau IV-11.

Tableau IV-11 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à deux pôles (atmosphère et léger) avec un $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger est alors fixé à -24.5 ‰.

Date prélèvement	Localisation	δ13C-CO2 (‰)	% Atmosphère	% Léger
24/02/2015	ST	-22.8	11%	89%
	DA	-22.7	12%	88%
	ABS	-23.1	9%	91%
	GM	-23.7	5%	95%
	BD	-22.8	11%	89%
	HD	-22.9	11%	89%
	SE	-23.0	10%	90%
04/05/2015	ST	-22.8	11%	89%
	DA	-22.7	12%	88%
	ABS	-22.2	15%	85%
	GM	-23.6	6%	94%
	BD	-22.2	15%	85%
	HD	-23.0	10%	90%
	SE	-22.8	11%	89%
23/02/2016	ST	-22.3	15%	85%
	DA	-22.1	16%	84%
	ABS	-22.3	15%	85%
	GM	-22.4	14%	86%
	BD	-22.1	16%	84%
	HD	-22.8	11%	89%
	SE	-22.6	13%	87%

Les résultats sont alors beaucoup plus cohérents. Cependant, le problème rencontré au cours de l'exploitation des données de $\delta^{13}C$-CO_2 montre la limite de cette méthode et plus particulièrement la difficulté de déterminer le $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger qui conditionnera par la suite les calculs de mélange. De plus, comme précédemment, le point BD situé à plus de 20 m de profondeur présente des valeurs de $\delta^{13}C$-CO_2 plus enrichi que les autres points et donc une participation plus importante de l'atmosphère. A nouveau, il parait difficile de penser que ce point où les teneurs en CO_2 les plus importantes de la cavité sont mesurées, soit soumis à une influence atmosphérique non négligeable. Il semblerait donc que le membre léger soit différent pour ce point ou bien qu'un pôle supplémentaire soit mis en jeu dans la constitution du signal de $\delta^{13}C$-CO_2 du CO_2 en ce point particulier. Il serait donc nécessaire de calculer la participation distincte de chacun des trois pôles. Cependant, ce calcul n'est pas réalisable sans

considérer un traceur supplémentaire tel que le Radon (Rn222) qui n'est à l'heure actuelle pas mesuré dans la grotte de Lascaux.

IV.4.3 Principaux mécanismes aérologiques internes à l'origine de la répartition des PCO_2 dans la cavité de Lascaux :

IV.4.3.1 Influence de la pression atmosphérique sur les teneurs en CO_2 dans la cavité :

- Zone Axiale et Droite de la cavité

Comme précédemment, l'impact de la pression atmosphérique sur la dynamique du CO_2 est évalué en considérant l'évolution de la pression interne et des PCO_2 enregistrées dans les différentes parties des zones axiale et droite de la cavité (Figure IV-28).

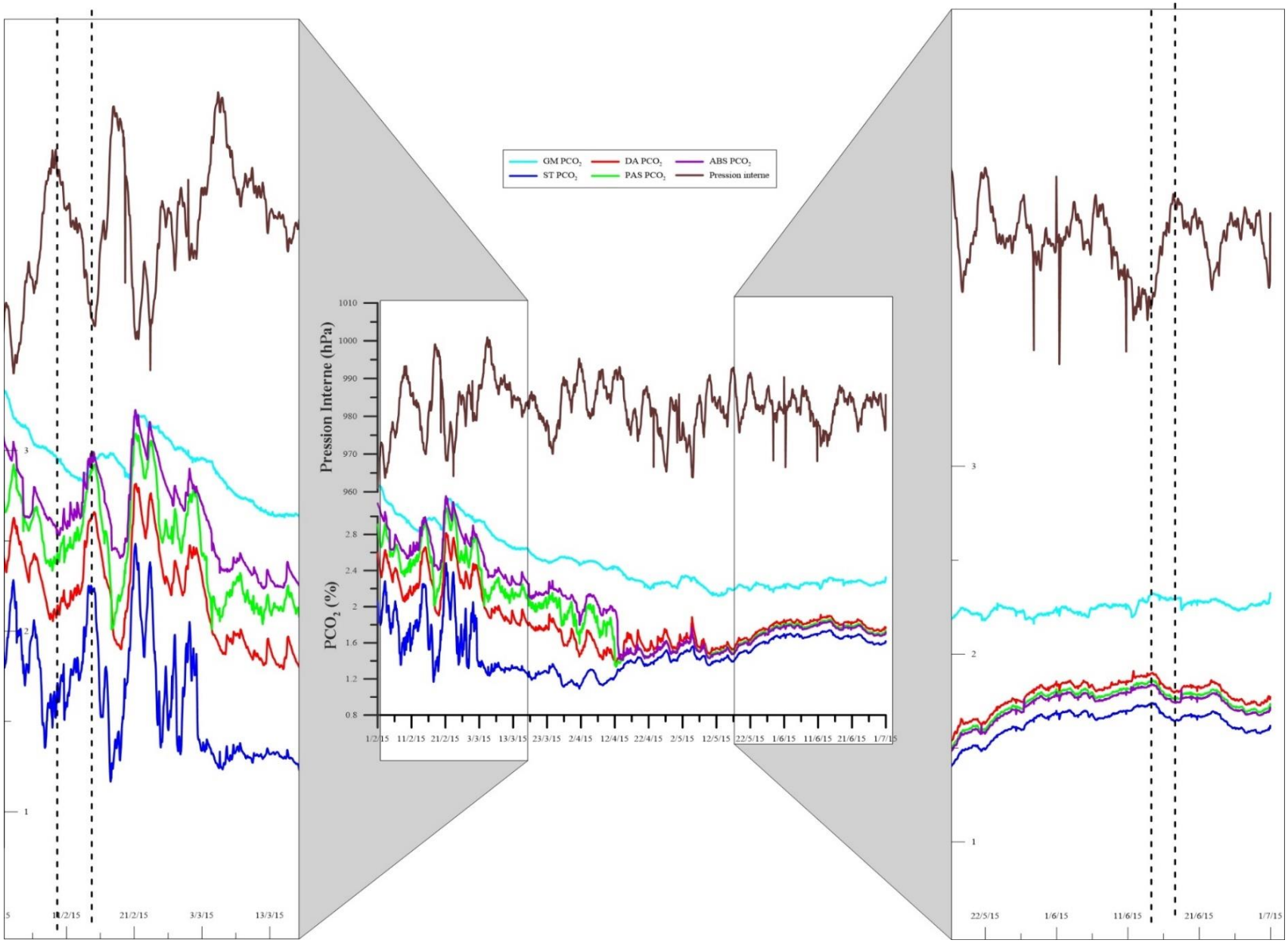


Figure IV-28 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et des PCO_2 mesurées dans les parties axiale et droite de la cavité du 01/02/2015 au 01/07/2015. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique.

L'analyse graphique des séries temporelles de PCO_2 et de la pression interne montrent que ces deux paramètres sont inversement corrélés tout au long des six premiers mois de l'année. Néanmoins, cette relation est plus ou moins forte selon la période considérée avec tout d'abord une forte influence des variations de pression interne sur les PCO_2 au cours du mois de Février 2015 ; les phases de décompression et de compression de l'air de la cavité sous l'influence de la pression barométrique entrainent des variations de PCO_2 pouvant atteindre 1.5 % pour tous les points de mesure à l'exception de GM dont la variabilité est moins importante (0.5 %). A cette période, les teneurs en CO_2 dans le PAS et l'ABS dépassent lors des fortes baisses de pression la teneur en CO_2 observée dans la GM. Cette observation ajoutée au fait que la teneur en CO_2 augmente en premier lieu dans l'ABS semble démontrer que l'air fortement concentré en CO_2 ne provient pas du fond de la partie droite (GM et CF), mais plutôt de l'éboulis du Bas de la Grande Diaclase ce qui suggère une origine principale du CO2 provenant de l'éboulis.

Par la suite, du mois de Mars 2015 à la mi-Avril, l'impact de la pression atmosphérique sur les PCO_2 diminue pour devenir ensuite quasiment nul lorsque les PCO_2 sont similaires dans la Salle des Taureaux, le Passage, le Diverticule Axial et l'Abside. Ainsi, il semblerait que comme lorsque le pompage est en marche, un autre mécanisme aérologique interne réduise l'influence de la pression barométrique sur la variabilité des PCO_2 dans cette zone de la cavité.

- Grande Diaclase

Une analyse similaire est produite pour les mesures réalisées dans la Grande Diaclase du mois de Février au mois de Juin 2015 (Figure IV-29).

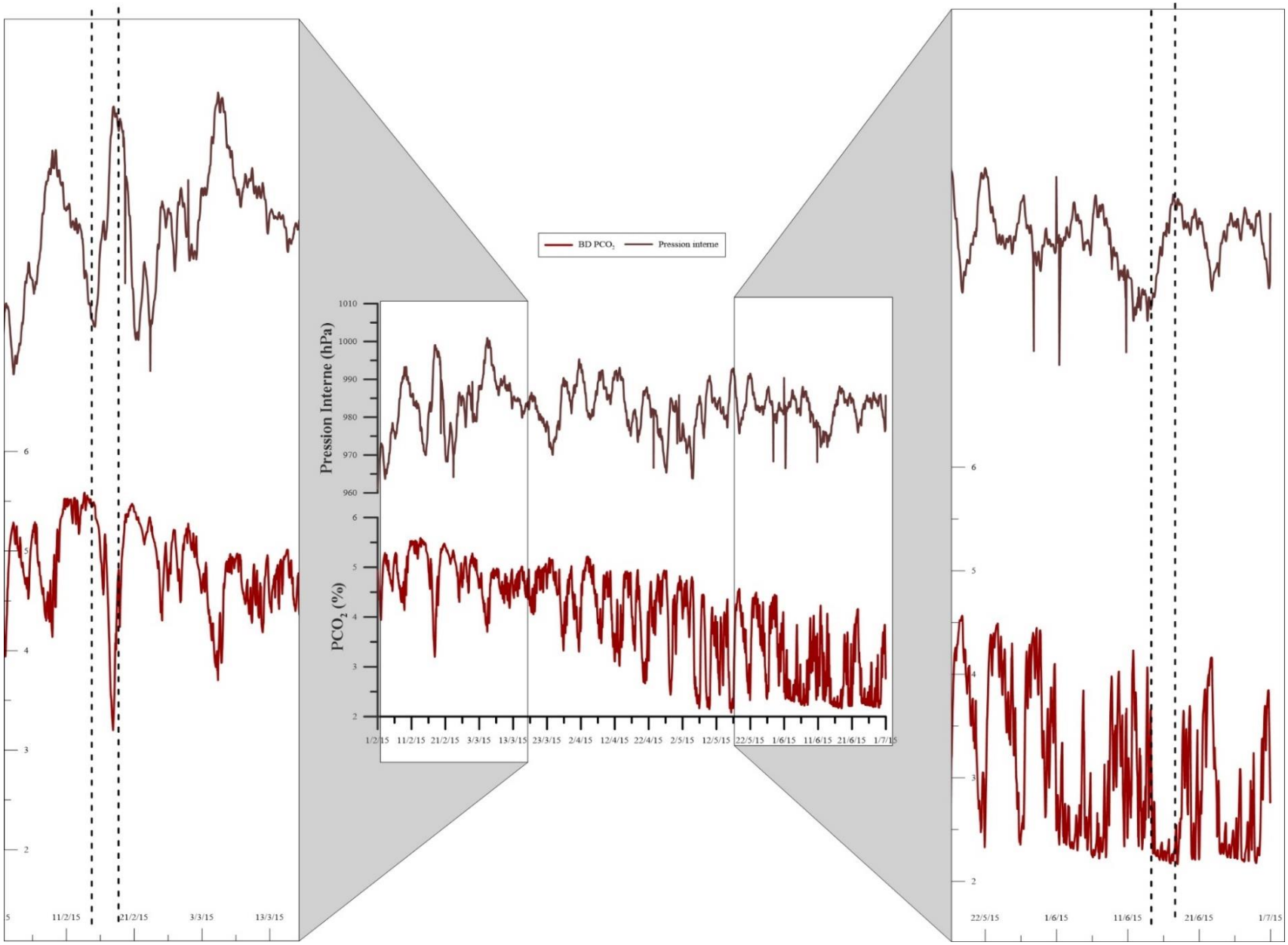


Figure IV-29 : Evolution de la Pression Interne (en Haut) et de la PCO_2 mesurée au Bas de la Diaclase du 01/01/2014 au 01/06/2014. Deux zooms sont effectués sur les mois de janvier (à gauche) et Mai (à droite). Les tirets signalent deux épisodes de variation importante de la pression atmosphérique.

L'analyse graphique des séries temporelles de PCO_2 et de pression barométrique pour cette période de l'année montre clairement le rôle important des variations de pression. Cependant, comme précédemment, cette relation n'est pas constante au cours de cette période. En effet, du 01/02/2015 au début du mois d'Avril, les variations de la pression entrainent une variabilité de la PCO_2 de l'ordre 0.5 à 1 % en moyenne avec toutefois une baisse de plus de 2 % lors de l'augmentation importante de la pression à la mi-Février.

Les variations de la pression, bien que plus faibles qu'au cours des mois d'hiver, produisent des variations de la PCO_2 de l'ordre de 2 % en moyenne. Les teneurs en CO_2 maximales lors des baisses de pression sont alors inférieures à celles observées au cours des deux premiers mois. De la même façon, lors des périodes de haute pression barométrique, les teneurs en CO_2 minimales relevées sont bien inférieures à celles rencontrées précédemment.

Ainsi, les variations barométriques font subir des phases de compression/décompression à la masse d'air fortement concentrée en CO_2 arrivant au niveau de l'éboulis de la partie basse de la Grande Diaclase. C'est donc ce paramètre qui contrôle en grande partie le flux de CO_2 entrant dans la cavité par cette zone qui selon Schoeller (1965) met en relation la cavité avec une « réserve de CO_2 » sous-jacente de l'ordre de 30 000 m^3 correspondant à une volume de massif de 300000 m^3 pour une porosité de 10%, les dernières connaissances acquises sur l'environnement géologique de la cavité semblant plutôt montrer que cette diaclase permet les communications avec le massif sus-jacent et donc potentiellement l'épikarst et les formations altéritiques qui lui sont associées. Cette hypothèse expliquerait donc pourquoi des concentrations en CO_2 de l'ordre de 5 % sont mesurées dans cette partie de la cavité tout comme dans le forage FR4 (8 m de profondeur dans les calcaires de l'épikarst). La variabilité importante de la PCO_2 à l'éboulis ne résulte donc pas seulement de mécanismes aérologiques internes liés d'une part aux variations barométriques et d'autre part à un second mécanisme aérologique interne.

IV.4.3.2 Stratification et homogénéisation des masses d'air par la mise en place de cellules de convections

IV.4.3.2.1 Zones Axiale et droite

Pour déterminer la nature des mécanismes aérologiques internes responsables de la variabilité des PCO_2 dans ces zones de la cavité, nous reprenons la même démarche que celle entreprise en contexte de pompage (Figure IV-30).

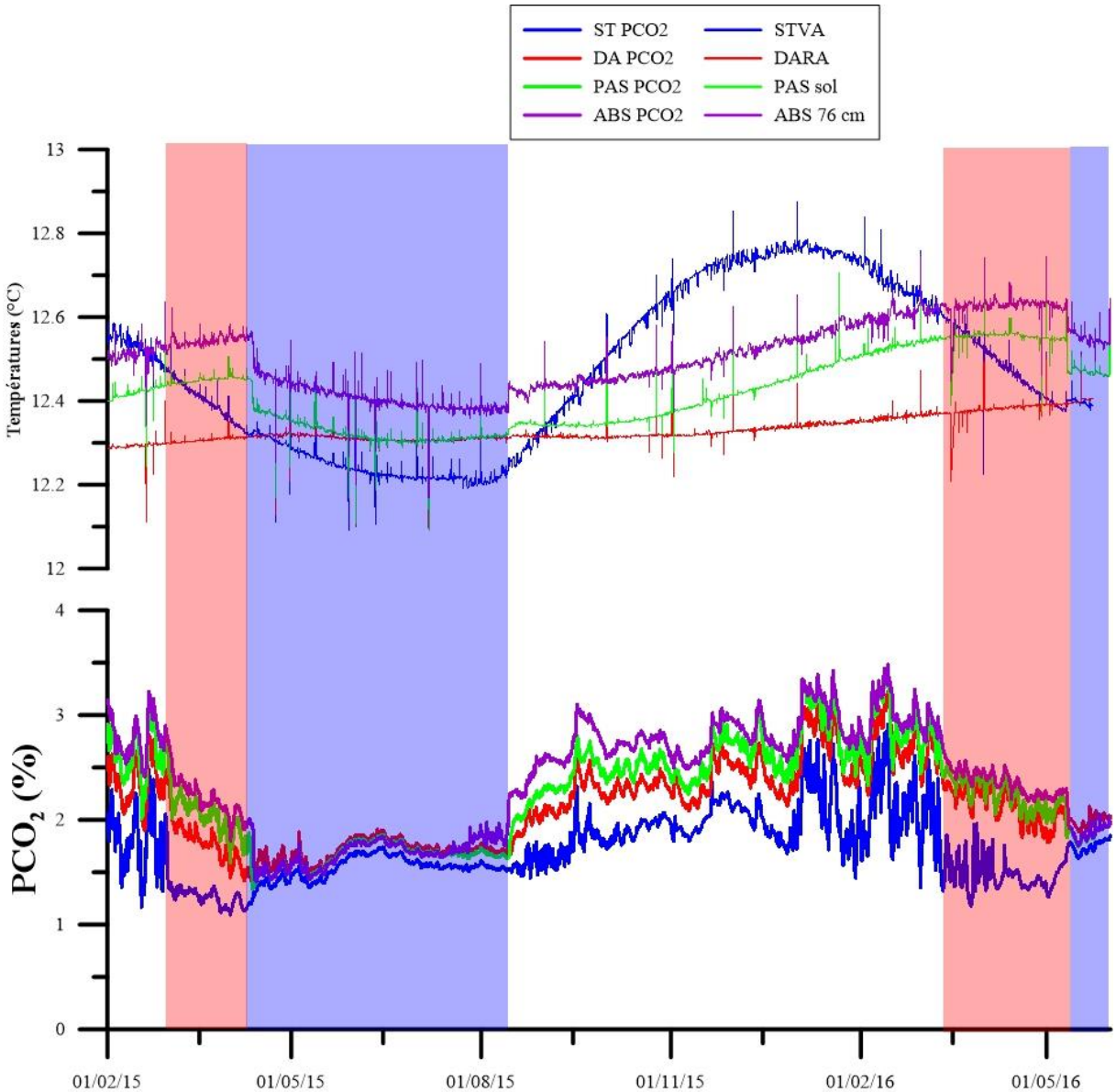


Figure IV-30 : Evolution des températures et des PCO_2 mesurées dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS du 01/02/2015 au 01/06/2016. Les remplissages bleutés (convections généralisées) et rouges (convections restreintes) marquent les périodes au cours desquelles les températures et les PCO_2 permettent de mettre en évidence différents régimes aérologiques.

Les PCO_2 mesurées dans les différentes zones présentent des variations significatives au cours de l'année. Cette variabilité est provoquée par l'occurrence de trois conditions ou régimes aérologiques différents dans la cavité :

- Stratification des masses d'air au cours du mois de Février 2015 puis d'Août 2015 à Avril 2016 lorsque le gradient thermique est négatif en fonction de la profondeur. Au cours de ces périodes, les masses d'air et donc les PCO_2 sont bien différenciées avec la profondeur et réagissent fortement aux variations de pression. Les transferts de CO_2 dans la cavité se font alors uniquement sous l'effet de transferts advectifs ponctuels produits par les variations de pression et dans une moindre proportion par diffusion.
- Convections restreintes dans les différentes salles de la cavité au cours des mois d'Avril 2015 et 2016 lorsque le gradient thermique s'inverse entre la ST, le PAS et l'ABS. A cette période, les teneurs en CO_2 sont encore différenciées selon la profondeur mais sont moins influencées par la pression. Des écoulements d'air de faible intensité se mettraient donc en place entre ces salles, diminuant ainsi l'hétérogénéité des masses d'air dans ces parties de la cavité.
- Convections généralisées de la mi-Avril 2015 à la fin du mois de Juillet 2015 puis à partir du mois de Mai 2016. Les teneurs en CO_2 sont alors homogénéisés par des mouvements d'air convectifs lorsque le système est déstabilisé par l'inversion du gradient thermique entre la ST et le DA. L'air froid s'écoule alors au sol du PAS et de l'ABS comme le montre la diminution de la température de l'air dans ces salles. Cette air se réchauffe et remonte alors vers la ST où une augmentation de la température est enregistrée à la voûte. L'arrêt des mouvements d'air convectifs se produit alors à la fin du mois de Juillet entrainant une augmentation des températures enregistrées au PAS et dans l'ABS ainsi qu'une baisse à la voûte de la ST. Les signaux de PCO_2 se dissocient alors sous l'effet de la stratification des masses d'air.

Ainsi, comme en période de pompage de l'air de la cavité, la dynamique du CO2 dans ces zones ornées de la cavité est principalement contrôlée par des mécanismes aérologiques internes qui se succèdent au cours de l'année selon la répartition spatio-temporelle des températures avec la profondeur. Cette dernière est la résultante de la conduction des ondes thermiques externes à travers le massif karstique sus-jacent. Le déphasage temporel découlant de ce mécanisme de conduction thermique est donc à l'origine de l'établissement d'un gradient thermique dynamique dans la cavité qui s'inverse au gré des saisons.

IV.4.3.2.2 Grande Diaclase

L'analyse de l'influence de la pression atmosphérique a montré que la dynamique du CO_2 dans la Grande Diaclase est conditionnée par un mécanisme aérologique interne à la cavité. Pour déterminer la nature de ce mécanisme ainsi que distinguer les périodes au cours desquelles celui-ci se met en place, les températures et PCO_2 mesurées en BD, HD et dans les SE sont analysées parallèlement à partir de la Figure IV-31.

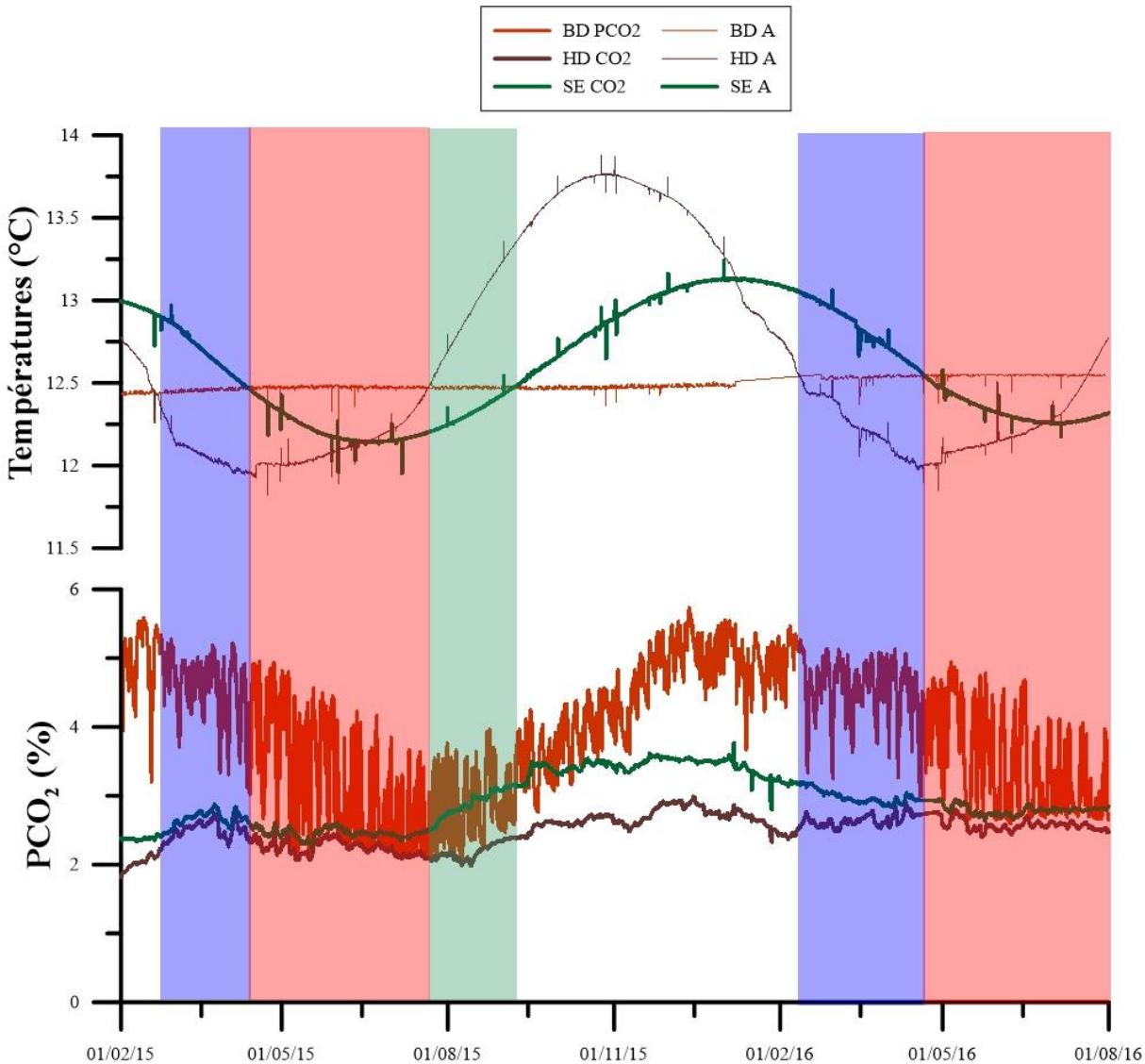


Figure IV-31 : Evolution des températures et PCO_2 mesurées en BD, HD et dans les SE du 01/02/2016 au 01/08/2016. Les zones bleutées, rouges et verte signalent les périodes au cours desquelles les transferts convectifs se mettent en place dans la Grande Diaclase.

En étudiant la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 et des températures de l'air, il est possible de distinguer dans cette partie de la cavité, trois conditions ou régimes aérologiques analogues à ceux déjà mis en évidence dans la ST, le DA, le PAS et l'ABS :

- Stratification de la masse d'air selon la profondeur du mois de Septembre 2015 jusqu'à la mi-Février 2016. Au cours de cette période, les PCO_2 mesurées sont différenciées selon un gradient croissant en fonction de la profondeur (HD PCO_2 < SE PCO_2 < BD PCO_2). Cette configuration aérologique conditionnée par le gradient thermique négatif entre la zone sommitale (HD) et la zone basse (BD) de la diaclase implique que les transferts de CO_2 se produisent sous l'impact des mécanismes de diffusion et d'advection suite aux variations barométriques. La PCO_2 au BD augmente alors continuellement sous l'influence de la dynamique du CO_2 dans le massif sus-jacent.
- Convections entre BD et HD à la fin de l'hiver (bleu). A cette période, le gradient thermique entre ces deux zones de la diaclase s'inverse produisant alors une déstabilisation de la masse d'air sous l'impact d'écoulements d'air ascendants et descendants. La PCO_2 au point BD tend alors à diminuer lentement sous l'impact de l'apport de l'air moins concentré en CO_2 présent en partie sommitale.
- Convections généralisées entre BD, SE et HD de la mi-Avril à la fin du mois de Juillet 2015 mais aussi à partir de la mi-Avril 2016 (rouge). Durant cette période, la température dans les SE devient à son tour inférieure à celle du BD. Les cellules convectives s'établissent alors dans toute la diaclase et semblent gagner en intensité. En effet, la teneur en CO_2 diminue alors fortement au point BD sous l'impact de l'homogénéisation de la masse d'air. En condition de haute pression, la PCO_2 au point BD est alors similaire à celle mesurée en HD.
- Convections entre BD et SE de fin Juillet à mi-Octobre 2015 (vert). L'arrêt des échanges avec le HD semble renforcer les convections entre BD et SE. La teneur en CO_2 augmente alors en BD et dans les SE. Ainsi, si l'on excepte les variations de PCO_2 liées à la pression barométrique au BD, les teneurs en CO_2 sont similaires en ces deux points de la diaclase. Par la suite, lorsque ces échanges s'amenuisent et se coupent la PCO_2 dans les SE se stabilisent quand celle du BD augmente progressivement pour atteindre des teneurs similaires à celles relevées dans l'épikarst profond.

Ainsi, comme dans les autres zones de la cavité, la dynamique du CO_2 est contrainte en grande partie par des mécanismes aérologiques internes à la cavité qui puisent leur origine dans le déphasage temporel avec la profondeur de l'arrivée des ondes thermiques extérieures conduites à travers le massif sus-jacent.

IV.4.4 Conclusion sur la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux en période d'arrêt de l'extracteur

En contexte « naturel », l'analyse fine des séries temporelles de PCO_2 et de température ont permis de montrer que la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux est la résultante de plusieurs mécanismes d'échanges entre la cavité et son environnement direct (atmosphère et massif karstique) mais aussi par des phénomènes aérologiques internes à la cavité. Les cartes d'interpolation de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la cavité de Lascaux à différentes périodes de l'année permettent d'appuyer ces conclusions (Figure IV-32).

En premier lieu, l'étude des différences de masse volumique entre l'atmosphère et la cavité ainsi que le calcul de la proportion de CO_2 atmosphérique présente dans l'air des différentes zones de la cavité ont permis de montrer que les échanges entre cavité et atmosphère existent mais ne sont pas suffisamment importants pour permettre un renouvellement total de l'air et donc du CO_2 de la cavité au cours des périodes hivernales comme cela est le cas pour d'autres cavité dans la région. La présence de SAS à l'entrée de la cavité explique notamment ce comportement particulier. Il est donc cohérent de penser qu'en période d'arrêt du pompage, les échanges entre cavité et atmosphère n'influencent que très peu la dynamique du CO_2, mise à part à travers le transfert diffusif minoritaire et les fortes variations de la pression barométrique qui peuvent provoquer l'entrée ponctuelle dans le temps d'air atmosphérique peu concentré en CO_2.

Dans un même temps, le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 aux différents points investigués de la cavité, présente des valeurs similaires pour les trois campagnes de mesure, témoignant ainsi d'une certaine homogénéisation du CO_2 et/ou à minima de la présence d'une source de CO_2 majoritaire au sein de la cavité qui imprime son marquage isotopique dans toute la cavité.

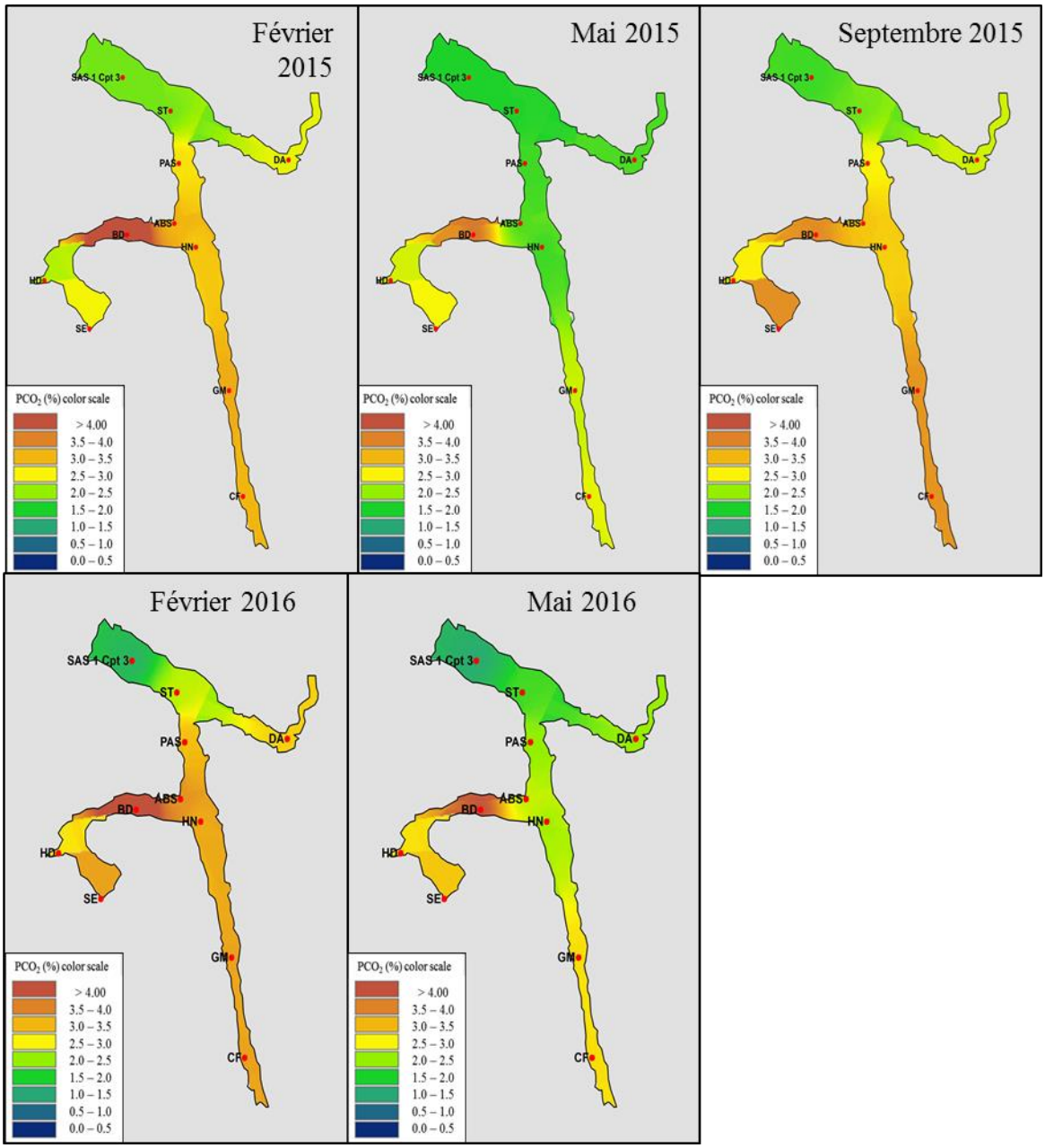


Figure IV-32 : Cartes d'interpolation de la répartition spatiale des teneurs en CO_2 dans la cavité de Lascaux au cours des années 2015 et 2016. Les mois de Février, Mai et Septembre sont mis en avant car ils permettent de mettre en lumière les périodes au cours desquelles la répartition spatio-temporelle des PCO_2 dans la cavité est différente.

À la vue de l'évolution des PCO_2 dans les salles de la cavité, il est cohérent d'affirmer qu'une source principale de CO_2 est localisée dans la partie basse de la Grande Diaclase ou des teneurs en CO_2 supérieures à 5 % sont souvent mesurées. Le signal isotopique de cette source de CO_2 est compris entre -22.1 et -22.8 ‰ comme c'est le cas du CO_2 de l'air mesuré dans l'épikarst à 8 mètres de profondeur (FR4). Cette observation montre donc que la majorité du CO_2 présent dans la cavité semble provenir de cette zone superficielle de la zone vadose dans laquelle la PCO_2 et le signal isotopique sont les moins variables au cours de l'année. La Grande

Diaclase permet donc la communication entre cette zone profonde de cavité et la zone plus superficielle de l'épikarst. Ainsi, au niveau de cet éboulis, ces flux entrant de CO_2 semblent être conditionnés d'une part par les mécanismes internes au massif karstique qui conditionnent la dynamique du CO_2 dans l'épikarst. Cependant, le couplage des séries temporelles de pression barométrique, de PCO_2 et de température enregistrées dans la Grande Diaclase montre que cette dynamique est aussi affectée par des phénomènes aérologiques internes à la cavité provoqués par les inversions successives du gradient thermique avec la profondeur. Ces inversions causées par le déphasage temporel de l'arrivée de l'onde thermique conduite depuis la surface vers la profondeur, sont à l'origine de thermoconvections qui homogénéisent les PCO_2 de cette zone de la cavité à certaines périodes de l'année et notamment au printemps et en été. S'ajoute aussi l'influence de la pression barométrique qui agit de façon importante sur la source de CO_2 en lui imposant des phases de compression qui conduisent à une diminution des entrées de CO_2 dans la cavité, et à des phases de décompression responsables du phénomène inverse. Ainsi, lors de fortes baisses de pression comme cela est le cas en hiver (dépression hivernales), ce flux de CO_2 provoque une augmentation ponctuelle non négligeable de la PCO_2 dans toutes les autres parties de la cavité. La Figure IV-33 résume ces informations.

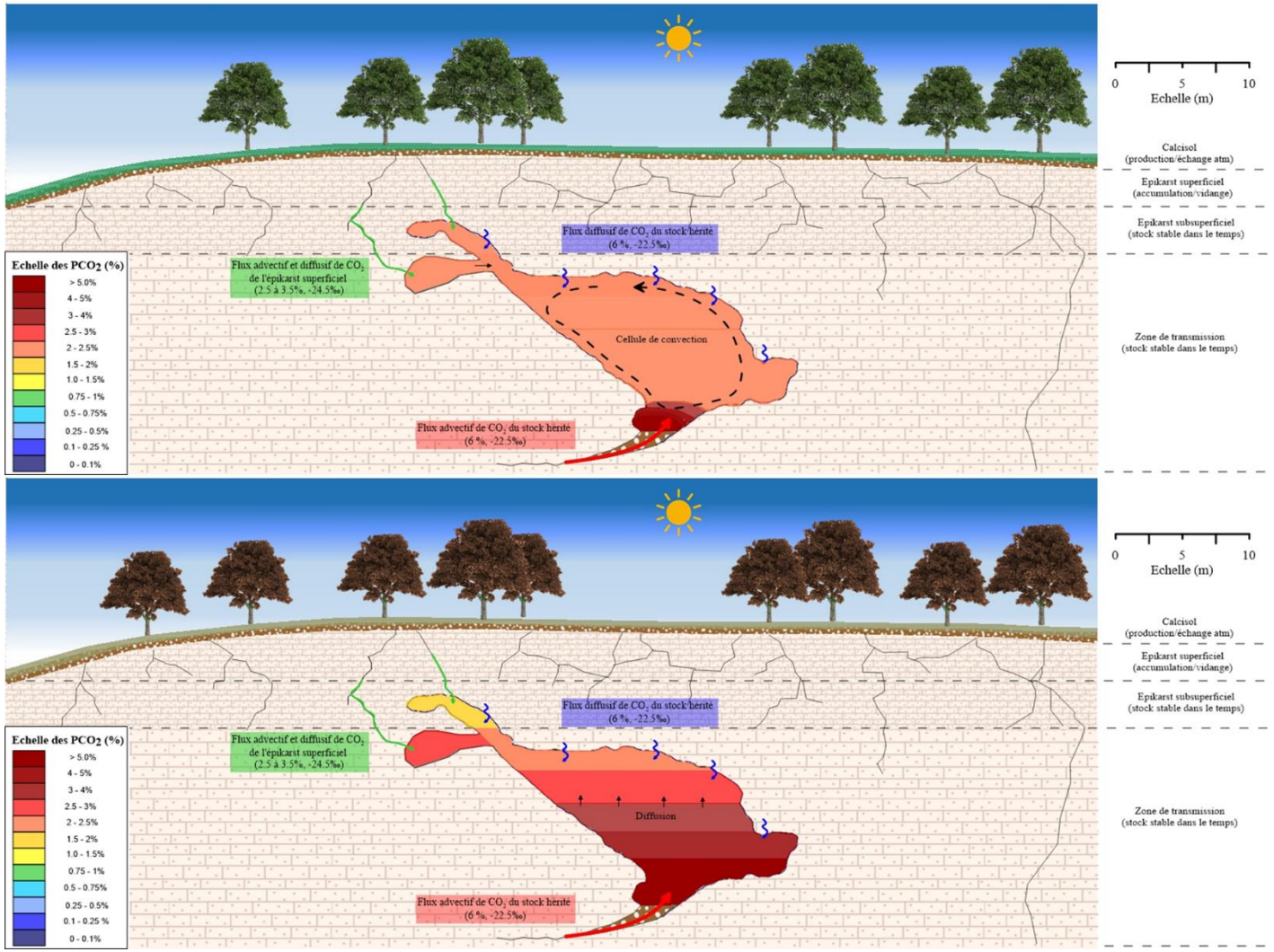


Figure IV-33 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) dans la Grande Diaclase en contexte naturel. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés.

De même, deux autres zones d'entrée préférentielle de CO_2 dans la cavité sont localisées dans la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins, mais aussi dans la partie sommitale de la Grande Diaclase, à savoir dans les Salles Ensablées. Ces zones présentent des PCO_2 moins importantes (comprises entre 3 et 4%) qui soulignent des flux d'air transportant des teneurs en CO_2 moins importantes dans la cavité, ou alors des mécanismes de dilution à l'arrivée de ces flux, notamment dans la Galerie Mondmilch dont le volume est très important comparé aux autres parties de la cavité. Le signal isotopique du CO_2 présentant des valeurs plus appauvries dans la Galerie Mondmilch, l'hypothèse de la participation d'un CO_2 plus appauvris et donc plutôt présent dans les horizons superficiels de l'épikarst serait donc à privilégier.

Pour ce qui est des parties plus superficielles de la cavité et notamment de la Salle des Taureaux, du Passage, du Diverticule Axial et de l'Abside, ces zones peuvent être considérées comme des zones d'échanges. Dans celles-ci, la dynamique du CO_2 est impactée d'une part par les arrivées de CO_2 provenant des zones profondes, par les échanges avec l'extérieur, mais surtout par l'occurrence de mécanismes aérologiques internes qui conditionnent grandement la variabilité des CO_2 au cours du temps. En effet, trois régimes aérologiques se mettent en place dans ces parties de la cavité au cours de l'année :

- La stratification des masses d'air avec la profondeur lorsque l'air le plus chaud est présent dans la Salle des Taureaux : les PCO_2 sont alors différenciées et croissantes avec la profondeur,
- Les convections restreintes dans ce système lorsque l'air le plus chaud est présent au niveau de l'Abside : les PCO_2 sont toujours différenciées mais varient de façon beaucoup moins importante suite aux variations barométriques.
- Les convections généralisées qui se mettent en place lorsque l'air de la Salle des Taureaux devient plus froid que celui du Diverticule Axiale : les PCO2 sont alors homogènes dans ces parties de la cavité du fait du brassage de l'air provoqué par les thermoconvections. Les variations barométriques n'ont alors qu'un impact limité.

Ces différents régimes aérologiques ont pour moteur le forçage climatique externe. En effet, la conduction de l'onde thermique de surface à travers le massif et le déphasage temporel de l'arrivée de celle-ci aux différentes profondeurs de la cavité, sont les moteurs de ces régimes aérologiques conditionnant en grande partie la dynamique du CO_2 dans ces zones ornées de la

cavité de Lascaux. La Figure IV-34 résume ces observations à travers deux schémas conceptuels de la répartition spatio-temporelle du CO_2 dans la zone droite de la cavité.

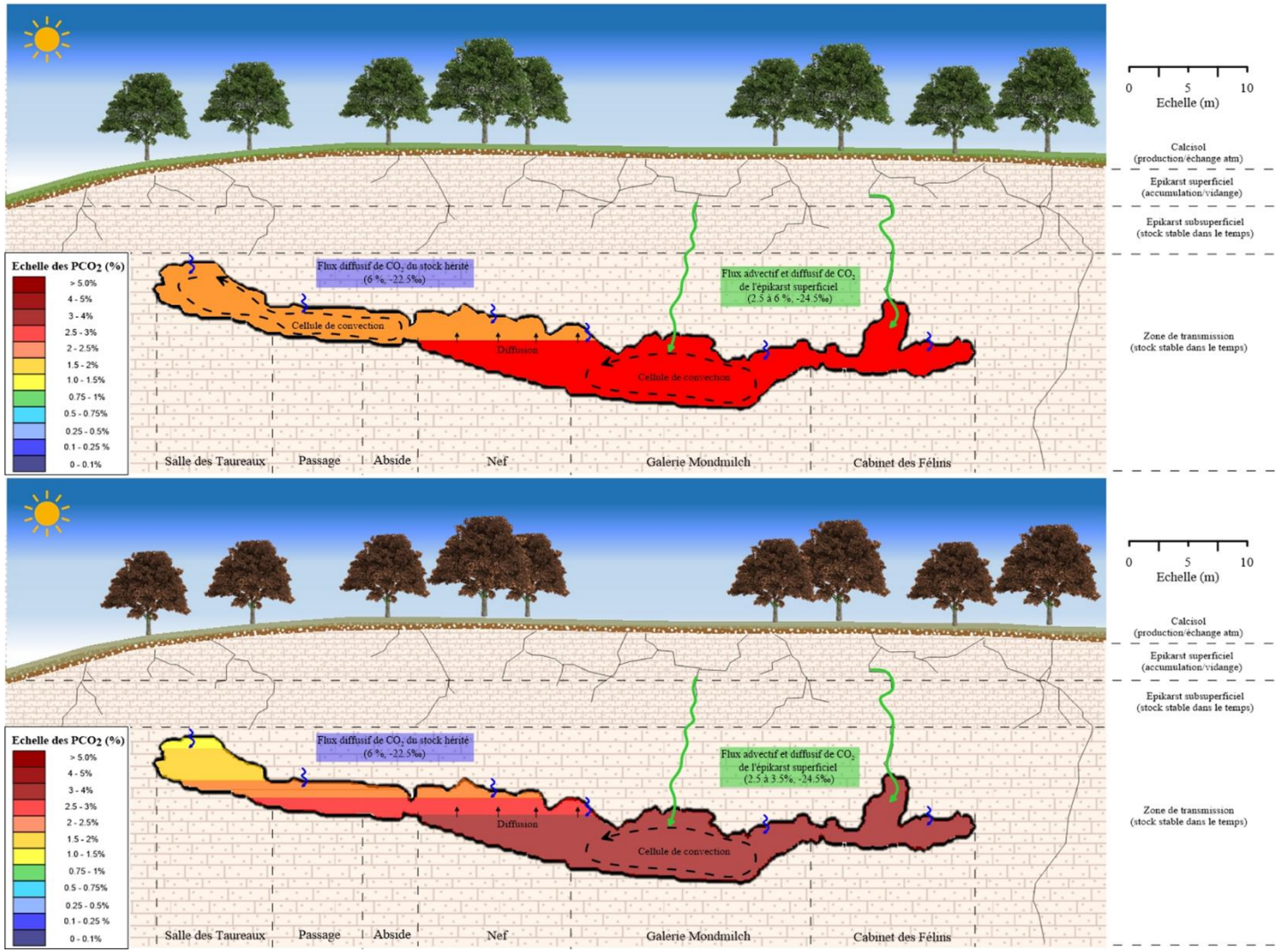


Figure IV-34 : Schémas conceptuels des différents régimes aérologiques influençant la répartition spatio-temporelle des PCO_2 au printemps et en été (en haut), et en automne et en hiver (en bas) en contexte de pompage dans la zone droite. Les principaux apports de CO_2 dans la cavité sont aussi représentés.

IV.5 Conclusion sur la dynamique du CO_2 en contextes de pompage et naturel

La quatrième partie de ce manuscrit avait pour objectif de déterminer la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux ainsi que l'impact du pompage sur cette dernière. Pour ce faire, notre étude s'est appuyée sur les différentes séries temporelles de données recueillies à travers le dispositif de surveillance des PCO_2 et paramètres microclimatiques de la cavité. L'analyse de ces séries temporelles ainsi que des données isotopiques ponctuelles du $\delta^{13}C$-CO_2 de l'air de grotte ont permis de discriminer les différents mécanismes à l'origine de la dynamique du CO_2 en contexte de pompage mais aussi en contexte « naturel ». En effet, au cours de ces trois années de thèse, l'extracteur d'air de la cavité a été arrêté dans le but d'acquérir des séries de données non affectées par ce dispositif afin de pouvoir conclure sur l'intérêt ou non d'un tel dispositif.

En premier lieu, l'enseignement principal de l'arrêt de l'extraction est l'augmentation générale des PCO_2 dans toutes les zones de la cavité. Les zones les plus affectées par cet accroissement sont la Salle des Taureaux, le Diverticule Axial, le Passage et bien sûr le Bas de la Grande Diaclase. A l'inverse, les PCO_2 de la Galerie Mondmilch, du Cabinet des Félins et des Salles Ensablées n'ont que très peu augmenté depuis l'arrêt de l'extraction. Ces observations sous-entendent donc que le pompage avait pour conséquence principale d'abaisser le niveau de CO_2 dans la cavité en supprimant la source principale (éboulis du BD) mais aussi de faire entrer dans la cavité un air faiblement concentré en CO_2.

Un autre impact potentiel du pompage sur l'aérologie résidait dans la modification de la configuration thermique de la cavité et notamment de la répartition spatio-temporelle des températures de l'air et de la roche. En effet, il est clair que le pompage modifie les échanges aérologiques entre cavité et atmosphère en les augmentant. De prime abord, l'évolution des températures de l'air dans les différentes zones de la cavité témoigne d'une augmentation significative pour les années 2015 et 2016 qui rappelons le, correspondent à la période d'arrêt du pompage. En effet, l'étude des moyennes mensuelles de ces températures (Figure IV-35) montre une augmentation minimale de 0.08 °C dans la Galerie Mondmilch et maximale de 0.25 °C dans la Salle des Taureaux et le Haut de la Diaclase. Néanmoins, il est encore difficile à ce stade de déterminer si l'arrêt du pompage en est la cause principale. En effet, les années 2014 et 2015 étant des années considérées comme chaudes par rapport à l'année 2013, leur impact sur les températures dans la Grotte pourrait expliquer cet accroissement des valeurs mesurées. De plus, dans le cas d'une entrée d'air continue dans la cavité provoquée par le pompage, l'influence attendue résiderait plutôt en une baisse des températures en hiver et une

augmentation en été qui résulteraient en une amplitude annuelle de variation plus importante. Cette tendance n'étant pas mise en évidence pour les années 2013 et 2014 (températures plus basses en été qu'après l'arrêt du pompage), il est donc plus cohérent de penser que le forçage climatique externe soit à l'origine de ces variations.

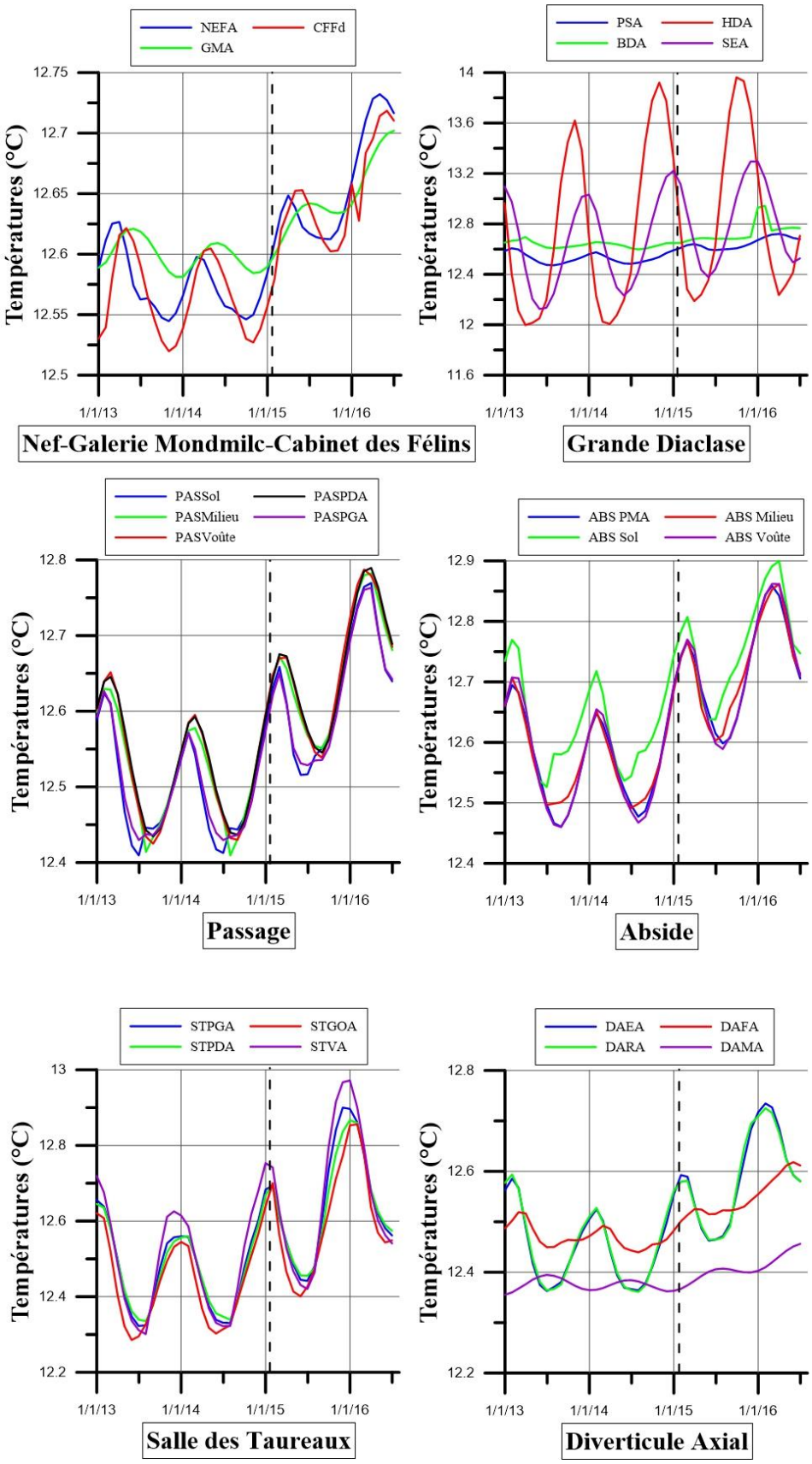


Figure IV-35 : Evolution des températures moyennes mensuelles de l'air de Janvier 2013 à Juillet 2016 dans la ST, le DA, le PAS, l'ABS, la zone de la NEF-GM-CF et la Grande Diaclase. L'arrêt du pompage est marqué par les pointillés.

Parallèlement, il été important de déterminer si le pompage avait une influence sur le déséquilibre thermique entre air et parois observé à certaines périodes de l'année dans la cavité. Ce point est d'autant plus important que ce gradient thermique peut être à l'origine de processus de condensation (gradient négatif entre paroi et air) ou d'assèchement (gradient positif entre paroi et air) qui peuvent avoir pour conséquences une altération potentiellement significative des supports ornés. A cette fin, les écarts de température entre air et roche pour chaque paroi équipée d'un couple de mesure (air et roche) ont été étudiés de 2013 à 2016 et sont présentés en Figure IV-36. Leur analyse graphique montre une faible modification de ces écarts avant et après l'arrêt de l'extracteur. En effet, seule la paroi gauche de la Salle des Taureaux dénote d'une évolution significative en faveur du processus de condensation. Cependant, il est important de noter que la machinerie de conditionnement de l'air n'a pas été mise en marche au cours des années 2015 et 2015 à contrario des années 2013 et 2014. Les écarts entre roche et air en ce point de mesure auraient donc sans doute été similaires en contexte de pompage sans l'intervention de la machinerie qui rappelons le, a pour vocation de maintenir un équilibre thermique entre l'air et la paroi par refroidissement de l'air de la cavité en période de réchauffement de ce dernier (fin d'été).

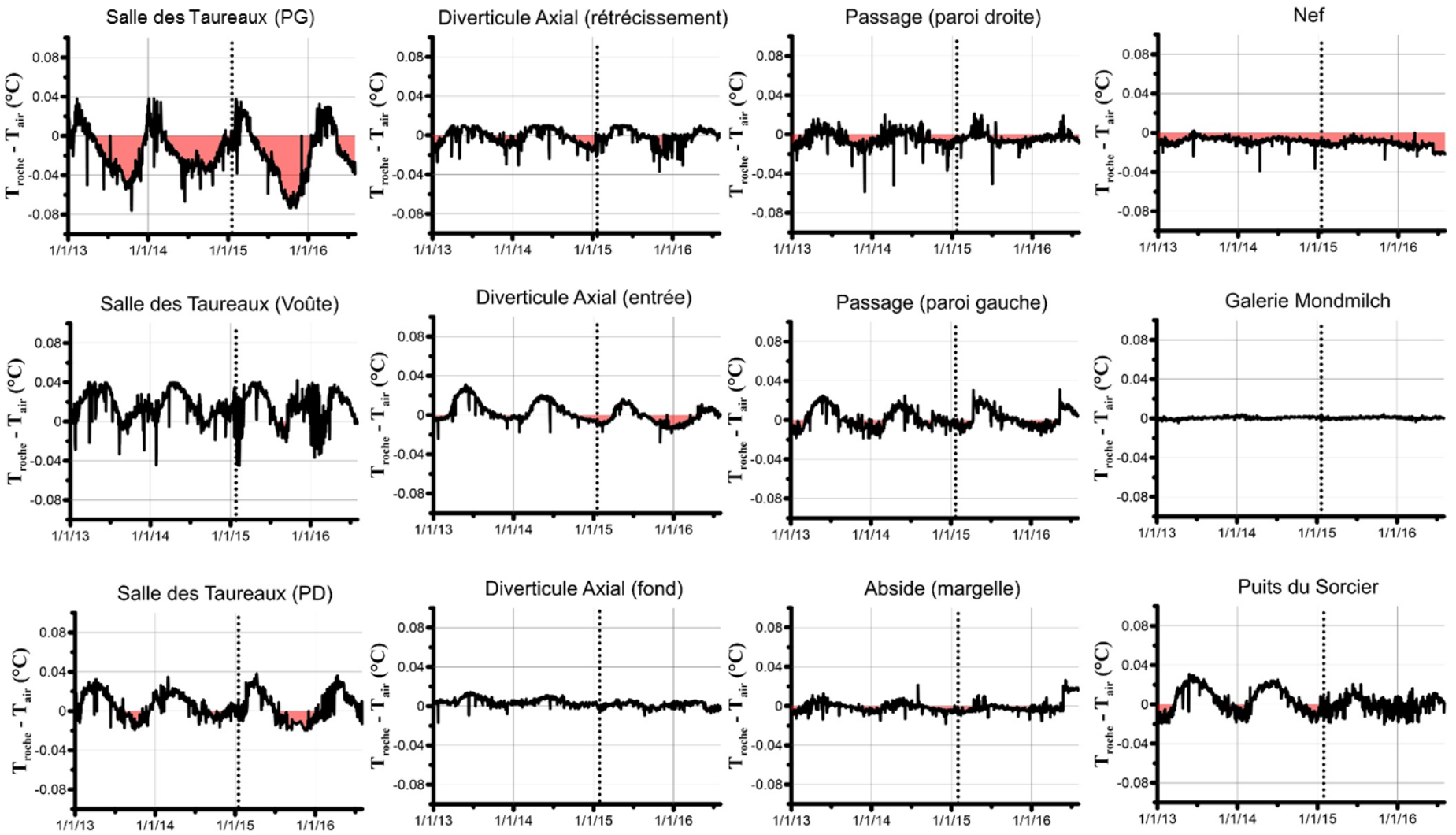


Figure IV-36 : Evolution des différences de température entre la roche et l'air (Troche-Tair) pour les différents points de mesure de la cavité de 2013 à 2016. Les pointillés marquent l'arrêt du pompage. Les zones en rouge signalent les périodes potentielles de condensation aux différentes parois suivies.

Ainsi, le pompage de l'air avait bien pour conséquence d'augmenter les entrées d'air extérieur dans la Grotte de Lascaux. Cependant, la présence de SAS de sécurité a permis une mise à l'équilibre de la température de l'air extérieur entrant avec celle de l'air et des parois de la cavité avant son introduction dans les parties ornées. Les risques de condensation aux parois ornées de la cavité ne sont donc pas accrus en contexte naturel.

En parallèle, plusieurs mécanismes à l'origine des échanges entre la cavité et son environnement, qu'il soit géologique ou atmosphérique sont étudiés. Ils agissent sur la dynamique du CO_2 dans la cavité que ce soit en période de pompage ou en période d'arrêt de ce pompage. A cela s'ajoutent les différents phénomènes aérologiques internes à la cavité qui conditionnent la majeure partie de la variabilité des teneurs en CO_2 à l'échelle saisonnière.

Il a été déterminée que les échanges naturels entre cavité et atmosphère n'influent que très peu sur la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux. Aucune corrélation claire n'est en effet retrouvée entre la variabilité de la PCO_2 et les périodes potentielles d'échanges entre la cavité et son environnement externe. Cette observation est en grande partie expliquée par la présence de SAS implantés dans le but de retranscrire les conditions microclimatiques régnant dans ce milieu souterrain fragile avant l'invention de la cavité. Néanmoins, ces propos doivent être nuancés. En effet, bien qu'aucun cycle de vidange de l'air de la cavité ne soit mis en évidence, des échanges doivent tout de même se mettre en place et il n'est pas interdit de penser que la cavité « souffle » en hiver à travers les gaines Froidevaux et reste isolée de l'atmosphère en été. De plus, il apparait qu'en période de pompage les PCO_2 sont beaucoup moins importantes et les proportions de CO_2 atmosphérique présentes dans la cavité sont quant à elles supérieures à celles relevées en contexte « naturel » (Tableau IV-12). Il semblerait donc que le pompage exerce un forçage artificiel sur les entrées d'air dans la cavité. Les signaux isotopiques plus appauvris en période de pompage dans les parties profondes de la cavité montrent que ce dernier « isole » d'un point de vue aérologique certaines zones de la cavité comme la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins. Le pompage forcerait alors les écoulements d'air entre les parties superficielles de la cavité et la Grande Diaclase. L'air entrainé dans la cavité par le pompage s'introduisait donc par l'entrée de la Grotte (air atmosphérique) mais aussi par le Haut de la Diaclase (air de l'épikarst superficiel).

Cependant, il nous faut rappeler que ce calcul de mélange à deux membres repose sur des hypothèses fortes telles que les valeurs du $\delta^{13}C$-CO_2 du membre léger variables selon le contexte (pompage ou « nature »). Peyraube (2012) pointe lui-aussi les fortes incertitudes liées

au signal du membre léger. Ainsi, on est en droit de se demander si dans le contexte de la Grotte de Lascaux qui renferme des zones d'alimentation en CO_2 différentes (BD, GM et CF), il ne serait plus adapter de considérer des équations de mélange entre 3 membres (atmosphère, sol et zone de transmission). Cependant, afin de résoudre ce type d'équation il est nécessaire de considérer un autre traceur tel que le Radon (^{222}Rn), traceur non mesurés dans la Grotte de Lascaux. Sans un troisième traceur, des hypothèses importantes sont de nouveau nécessaire ce qui ne rend cette démarche pour le moment inapplicable.

Tableau IV-12 : Récapitulatif des proportions de CO_2 atmosphérique et de CO_2 du membre léger participant à la composition totale du CO_2 présent dans aux différents points de prélèvement dans la cavité. Ces proportions sont calculées à partir d'une équation de mélange à trois pôles (atmosphère, léger 1 et léger 2).

Date	**Pompage**	**% Atmosphère**			**% Léger**		
		Moyenne	**Ecart type**	**Cv**	**Moyenne**	**Ecart type**	**Cv**
2014	oui	18%	0.10	55%	82%	0.10	12%
2015-2016	non	12%	0.03	24%	88%	0.03	3%

En parallèle, il a été montré que la Grande Diaclase (à travers l'éboulis) et le système Galerie Mondmilch/Cabinet des Félins sont les zones de la cavité où les flux de CO_2 provenant du massif sont les plus importants. Ces mécanismes de transfert advectif et diffusif du CO_2 de l'épikarst vers la cavité se font en effet par les fissures et fractures. Ces flux d'air plus ou moins concentré en CO_2 proviendraient de la partie profonde de l'épikarst pour la Grande Diaclase, et plutôt d'un horizon plus superficiel de l'épikarst pour ce qui est de la Galerie Mondmilch et du Cabinet des Félins. Cette compartimentation des origines de CO_2 a été rendu possible par la comparaison des dynamiques intra-cavitaire et épikarstique de ce gaz, mais aussi à travers la comparaison de la signature isotopique de gaz dans les divers compartiments étudiés. Ces flux de CO_2 sont contraints par la variabilité temporelle de la teneur en CO_2 dans les compartiments épikarstiques, mais surtout par des mécanismes aérologiques siégeant dans la cavité.

Il a été déterminé, aussi bien en période naturelle qu'en période de pompage, que les variations barométriques influent fortement sur les concentrations en CO_2 dans la cavité et notamment au bas de la Grande Diaclase. Les phases de décompression/compression imposée par ces phénomènes atmosphériques ont alors pour résultante des entrées de CO_2 provenant du massif, plus ou moins importantes dans la cavité. Une influence du flux entrant dans la cavité par l'éboulis est même retrouvée à plusieurs reprises en contexte naturel dans la Galerie Mondmilch sous l'effet des fortes dépressions hivernales. Cette observation était impossible en période de pompage tant ce flux été gommé par l'aspiration.

Le CO_2 ainsi présent dans les différentes zones de la cavité montre une variabilité saisonnière qui n'est pas attribuable aux mécanismes suscités. En effet, que ce soit en période de pompage ou en contexte naturel, cette variabilité est expliquée par la succession de différents régimes aérologiques internes dans les différentes parties de la cavité. Deux phases se succèdent dans la cavité sous l'impact d'un forçage climatique externe naturel. Le déphasage temporel selon la profondeur de l'arrivée des ondes thermiques de surface conduites à travers le massif karstique, est responsable de la variabilité du gradient thermique s'établissant avec la profondeur dans la cavité. Ainsi, les zones superficielles de la cavité (Salle des Taureaux et Haut de la Diaclase) sont successivement les plus chaudes (en hiver) et les plus froides (au printemps et en été), et inversement pour les zones profondes (Abside et Bas de la Diaclase). Au cours de la première configuration thermique, les masses d'air sont stratifiées avec la profondeur et les PCO_2 sont bien différenciées. A contrario, la seconde configuration conduit à une déstabilisation des masses d'air résultant en la mise en place de cellules thermoconvectives à l'origine de l'homogénéisation des PCO_2 dans les zones affectées. La distinction et la compréhension de ces deux régimes aérologiques permet de distinguer des périodes de l'année plus propice aux interventions humaines importantes dans la cavité, mais aussi les zones de la cavité les plus à risque vis-à-vis de la corrosion des parois ornées, la stratification des masses d'air étant la configuration la plus défavorable. Une perturbation de l'équilibre thermodynamique du milieu souterrain au sein d'une masse d'air stratifiée, portera son effet sur une zone restreinte alors que pour la seconde configuration, cette perturbation sera répartie dans toute la zone affectée par les thermoconvections. Les différentes périodes au cours desquelles ces régimes convectifs sont décelés, sont présentées en Figure IV-37.

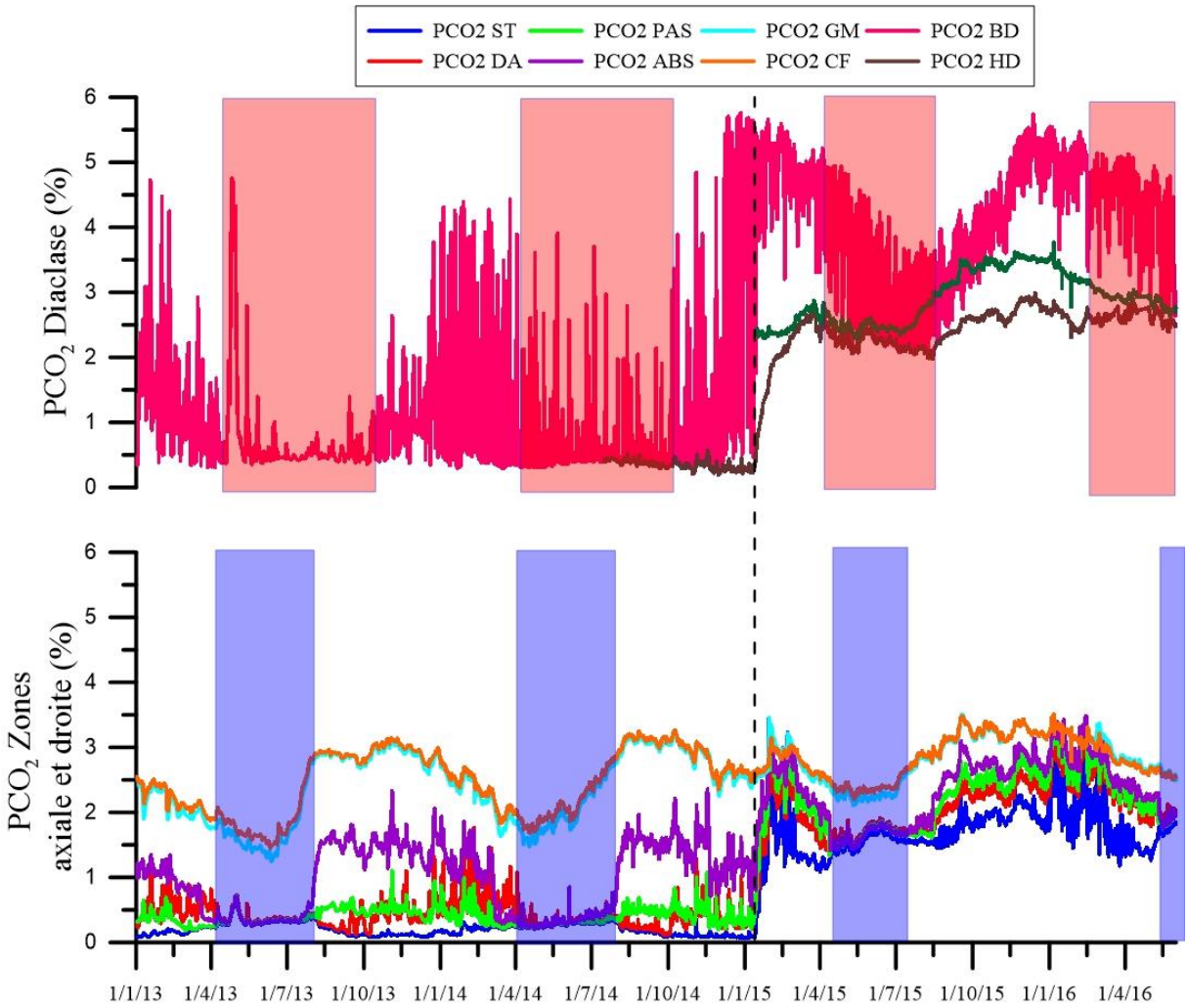


Figure IV-37 : Evolution des PCO_2 mesurées dans les différentes zones de la cavité. Les encadrés bleutés marquent les périodes au cours desquelles les thermoconvections sont mises en place dans les parties axiale et droite. Les encadrés rouges marquent les périodes de thermoconvections dans la Grande Diaclase. Les pointillés marquent l'arrêt du pompage.

Une différence notable est tout de même identifiée pour ce qui est de la répartition saisonnière des régimes aérologiques selon la présence ou non de pompage. En effet, les périodes au cours desquelles les thermoconvections sont observées dans les différentes zones de la cavité, s'étalent sur une durée moins importante en contexte naturel. Il se pourrait donc que le pompage entretenait ces cellules convectives. Cependant, le manque de données en période naturel (une année et demie) ne permet pas de l'affirmer de manière certaine.

L'analyse de l'impact du pompage du point de vue de la dynamique du CO_2 et de l'aérologie de la cavité de Lascaux a donc permis de produire plusieurs informations importantes pour la conservation des parois ornées. Il s'agit maintenant de s'intéresser aux équilibres calco-carboniques des eaux aux parois de la cavité.

V. Etude par le suivi en continu des traceurs naturels des conditions d'écoulement dans l'épikarst et de leurs impacts sur la variabilité des équilibres calco-carboniques aux émergences. Simulations des processus calco-carboniques aux parois de la cavité de Lascaux.

Le fonctionnement général de la zone vadose de la colline de Lascaux et plus particulièrement, de l'épikarst sus-jacent à la cavité de Lascaux a été largement étudié au cours des cinquante dernières années. Nous pouvons ainsi rappeler les premières études de H. Schoeller (1965) et Vouvé (1968) qui montrent la présence d'une réserve d'eau temporaire dans la partie inférieure de l'épikarst du fait de la présence d'un horizon « plus marneux » dont le rôle d'éponte de nappe est maintenant remis en cause. Puis les travaux plus récents de Lopez (2009) qui étudie le fonctionnement de cette zone vadose à travers la modélisation réservoir ou encore l'analyse des caractéristiques hydrochimiques et isotopiques des écoulements. Il détermine alors des temps de réponse aux sollicitations pluvieuses compris entre 26.5 heures et 37.5 heures selon les conditions d'écoulement. Xu (2015), s'intéresse quant à lui à la spatialisation de la réserve en eau de l'épikarst à travers l'observation de l'évolution de la teneur en eau de l'épikarst par la tomographie de résistivité électrique. Il montre la présence de zones dont la teneur en eau évolue en fonction de la pluie. Minvielle (2015), entreprend quant à lui une modélisation réservoir plus précise que celle de son prédécesseur et montre l'importance de la teneur en eau de l'épikarst sur le fonctionnement hydrodynamique de cette même émergence épikarstique. Ces simulations lui permettent de contraindre une zone contributive comprise entre 500 et 1000 m² selon les années étudiées.

Cependant, comme l'ont évoqué les deux auteurs des modélisations réservoirs, il est primordial de connaître de façon approfondie le fonctionnement réel de cet épikarst pour permettre une modélisation du comportement hydrodynamique plus pertinente. A cette fin, les conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst de la colline de Lascaux sont étudiées à travers l'évolution des signaux hydrogéochimiques des écoulements et notamment des traceurs naturels tels que le carbone organique dissous (COD) ou encore les isotopes de la molécule d'eau. Un suivi en continu in-situ de différents paramètres hydrochimiques de ces écoulements, permettra une meilleure compréhension des conditions d'écoulement (piston, dilution, écoulements rapides par les zones transmissives ou plus lents par les zones capacitives) dans l'épikarst. Les conséquences de ces conditions d'écoulement sur les équilibres calco-carboniques des eaux transitant dans la zone vadose seront ensuite décrites. Elles apporteront des éléments quant à l'évolution du potentiel de karstification des eaux de la zone vadose.

A ces problématiques de recherche, s'ajoutent des problématiques connexes relatives à la conservation des parois ornées de la Grotte de Lascaux et notamment la compréhension et l'évaluation de l'impact des eaux d'exfiltration et de condensation (précipitation, dissolution de

calcite) sur les supports calcitiques des ornements et notamment de la célèbre Salle des Taureaux. Pour cela, des simulations hydrogéochimiques seront entreprises en prenant en compte les informations relatives à la dynamique du CO_2 dans l'épikarst, dans la cavité mais aussi aux conditions d'écoulement dans l'épikarst et leur influence sur les équilibres calco-carboniques des eaux arrivant aux parois de la cavité. Ces simulations aboutissent au développement d'une méthode permettant l'estimation de l'évolution au cours du temps de la masse de calcite potentiellement affectée par les différents types d'eau aux parois. Cette méthode sera appliquée à une paroi de la Grotte de Lascaux en contexte de pompage ainsi qu'en contexte naturel. Elle permettra alors une évaluation de l'impact du pompage de l'air sur les équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux.

Ce chapitre sera composé de deux parties principales avec dans un premier temps l'étude des conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst et leurs influences sur les équilibres calco-carboniques des eaux. Cette première partie sera composée de trois sous-parties avec tout d'abord un état de l'art sur l'utilisation des traceurs naturels comme marqueurs des conditions d'écoulement mais aussi sur les équilibres calco-carboniques des eaux. Suivra alors la description du matériel et des méthodes employés, ainsi que la présentation des principaux résultats.

La seconde partie sera consacrée à la présentation de la méthode d'estimation de la masse de calcite potentiellement affectée aux parois de la cavité de Lascaux par les eaux de condensation et d'exfiltration. Elle sera divisée en quatre sous-parties avec en premier lieu la présentation des prérequis relatifs à l'étude de ces mécanismes, puis la description de la démarche de simulation suivie de l'évaluation de l'influence de chaque paramètre d'entrée sur le résultat final. Enfin, l'application de la méthode à la paroi gauche de la Salle des Taureaux sera présentée.

V.1 Etat de l'art sur l'étude des modalités d'écoulement dans la zone vadose à l'aide des traceurs naturels et isotopiques

V.1.1 Le COD, traceur des conditions d'écoulement et des temps de résidence dans le karst

Le carbone organique dissous (COD) est couramment employé pour étudier les systèmes naturels pour des objectifs divers et variés comme le suivi des flux de carbone organique dans les systèmes hydrogéologiques (cours d'eau, eaux de ruissellements, etc.) qui sert à déterminer l'origine et la dynamique de cette matière organique (Loye-Pilot, 1985 ; Hope et al., 1997). Il permet aussi de suivre les pollutions anthropiques et les contaminants métalliques ou organiques dans les systèmes (Albéric et al., 2000).

Plusieurs études ont utilisé ce traceur naturel pour caractériser le fonctionnement des aquifères karstiques comme Albéric et Lepiller (1998) qui ont montré que la quasi-totalité des réactions de dissolution des carbonates dans le système karstique du Val de Loire était imputable au CO_2 généré par l'oxydation de la matière organique carbonée apportée par les eaux fluviales (perte de la Loire). Ainsi, la quantité non négligeable de CO_2 produite par la dégradation de ces composés organiques, leur confère une importance particulière vis-à-vis de l'acquisition du potentiel de karstification des eaux d'infiltration.

Ce traceur est aussi utilisé en combinaison avec les traceurs chimiques et isotopiques pour appréhender le fonctionnement des aquifères karstiques (Emblanch et al. 1998 b). Batiot (2002) montre en effet que le COD a une sensibilité importante en tant que traceur naturel des écoulements comparativement aux autres traceurs couramment utilisés (Ca^{2+}, Mg^{2+}, $\delta^{13}C$). Ce traceur naturel permet donc de suivre la recharge diffuse et ponctuelle des aquifères karstiques mais aussi le temps de séjour dans les aquifères karstiques (Batiot et al., 2003 ; Celle-Jeanton et al., 2003 ; Mudarra et Andreo, 2011 ; Charlier et al., 2012).

Cependant, l'utilisation de ce traceur n'est pas aisée dans les systèmes karstiques. Simon (2011), utilise en effet ces composés comme traceurs de la pollution agricole des eaux d'infiltration dans l'épikarst de Dorvan (France). Il montre une variabilité importante au cours de l'année mais une corrélation moyenne entre flux de matière carbonée à l'exutoire et condition hydrologiques. Il attribue ce manque de cohérence aux processus de transport des matières carbonées qui sont selon lui différents des mécanismes d'infiltration. Tissier et al.

(2013) mettent en lumière la variation quantitative et qualitative de la matière organique à l'émergence d'un système karstique (La Roche Saint Alban, France). Cette variabilité saisonnière laisse présager des difficultés au cours de l'interprétation des mesures en continu du COD.

Le carbone organique total (COT) se présente sous la forme de différentes fractions (Figure V-1) :

- Le COP ou carbone organique particulaire représente les composés organiques dont la taille est supérieure à 0.45µm,
- Le COD ou carbone organique dissous est composé des molécules organiques de taille inférieure à 0.45 µm ; 10 % de ce COD est représenté par les fractions colloïdales. Ces agrégats sont constitués de molécules organiques souvent associées à des phases minérales.

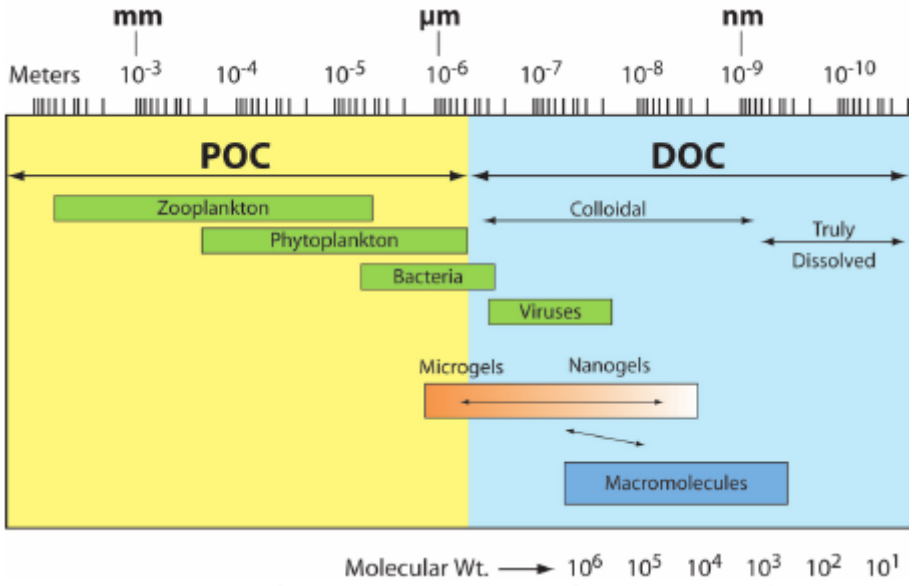


Figure V-1 : Continuum entre carbone organique particulaire (POC) et dissous (DOC) dans les eaux naturelles (Lee et al., 2004).

Dans les eaux de pluies, mais aussi dans les eaux naturelles souterraines, le COP ne représente une fraction négligeable du COT. Il est donc possible d'assimiler la concentration en COD au COT (Thurman, 1985). Dans les eaux interstitielles du sol, les teneurs en COD sont comprises entre 2 et 30 $mg.L^{-1}$ d'après Thurman (1985). Le COD diminue alors de l'horizon O du sol (riche en matière organique), jusqu'à la zone saturée de l'aquifère (Figure V-2). Cette diminution est relative aux phénomènes d'adsorption, d'oxydation et de dégradation microbienne du COD (Wassenar et al., 1991).

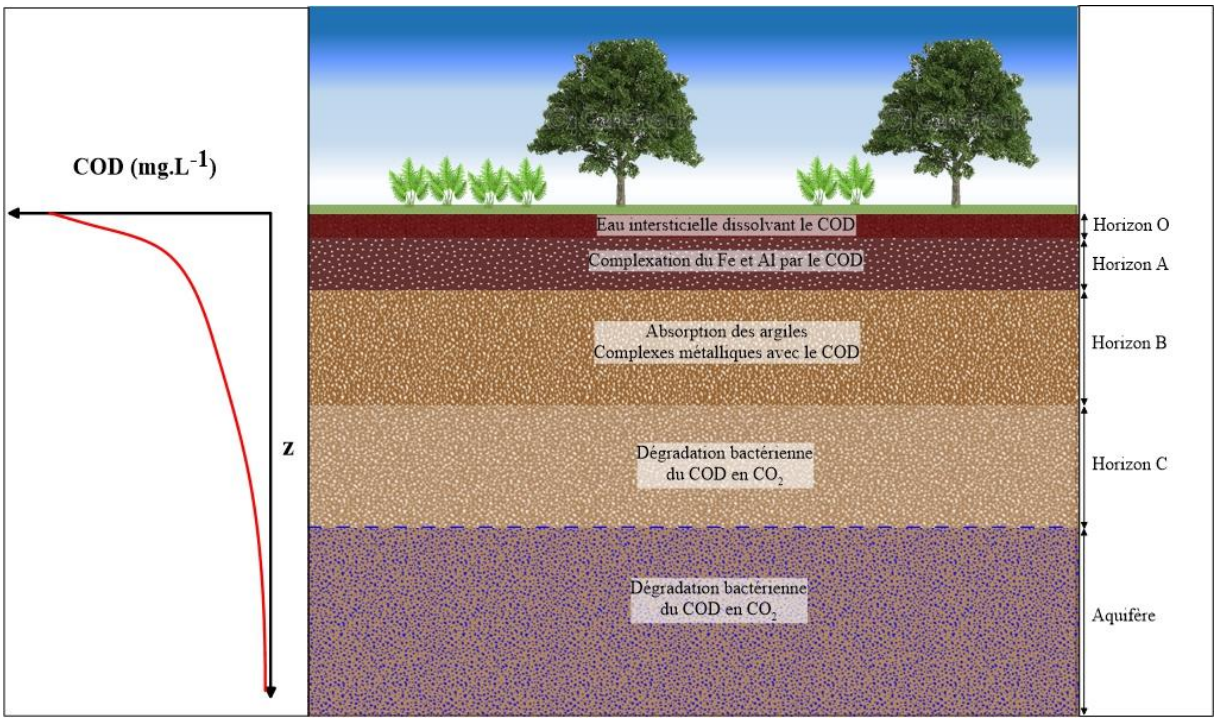


Figure V-2 : Diminution de la concentration en COD au cours de l'infiltration des eaux du sol vers la zone saturée de l'aquifère (modifiée par Batiot, 2002 d'après Thurman, 1985).

Dans les eaux naturelles, le COD est composé dans sa grande majorité (80 %) de substances humiques (acides humiques et fulviques provenant de la décomposition de la litière dans les sols) et d'acides hydrophiles (Thurman, 1985) ; 50 % du COD est donc d'origine humique, 30 % provient d'acide hydrophiles. Le restant est constitué de composés organiques simples, carbohydrates, acides carboxyliques, aminoacides et hydrocarbures (en cas de pollution).

Ce COD présent dans les eaux naturelles est après sa mise en solution dans les sols, peu à peu minéralisé et transformé en CO_2 par les micro-organismes présents dans le milieu. Cette biodégradabilité de la matière organique est conditionnée par les composés chimiques qui la constituent ainsi que par leurs propriétés dont leur taille moléculaire. Meyer et al. (1987) montrent en effet que les molécules de faibles tailles sont préférentiellement dégradées par l'activité microbienne comparativement aux composés de taille plus importante. Qualls et Haines (1992) montrent quant à eux que les carbohydrates de la fraction hydrophile sont dégradés rapidement. Les substances humiques réfractaires semblent elles constituer une fraction de la matière organique difficilement dégradable. C'est donc la composition du COD qui va déterminer sa biodégradabilité dans les systèmes naturels. Batiot (2002) propose une loi de biodégradation du COD obtenue à partir d'expérimentations en laboratoire et de mesures sur site. Cependant, il n'est pas forcément cohérent d'appliquer cette loi au système de Lascaux

tant la composition du COD est un facteur important. En effet, il est peu probable que cette composition soit la même sur notre site d'étude. La variabilité saisonnière de la qualité de la matière organique vient elle aussi apporter des difficultés au cours de l'interprétation de ces données comme le suggère Tissier et al . (2013).

V.1.2 Utilisation des isotopes de la molécule d'eau comme marqueurs du temps de séjour dans le karst :

Nous ne saurons présenter dans ce court chapitre une explication plus détaillée que celle proposée par Appelo et Postma (2005) ni plus pédagogique que celle de Clark et Fritz (1997). Les $\delta^{18}O$ et le $\delta^{2}H$ sont des outils de comparaison du ratio isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau par rapport au ratio de référence : le SMOW (Standard Mean Ocean Water). Les diverses molécules d'eau, composées d'isotopes lourds ou légers d'oxygène et d'hydrogène (8 combinaisons sont possibles) présentent des tensions de vapeur saturante différentes.

Lors d'un changement de phase, un fractionnement intervient entraînant un enrichissement ou un appauvrissement en isotope lourd. La nature est maligne et privilégie la solution la moins coûteuse en énergie : les passages « solide vers liquide vers gazeux » se font dans le sens de l'appauvrissement en isotope lourd. Il est en effet plus facile, par exemple lors de l'évaporation, de faire s'élever vers l'atmosphère une molécule légère plutôt qu'une molécule lourde. L'eau liquide restante est enrichie de façon relative en isotope lourd. A l'inverse, lors de la condensation aboutissant aux pluies, il est moins coûteux en énergie de « délester » le nuage des molécules lourdes. La pluie est alors enrichie par rapport au nuage, lui-même appauvri par rapport à l'océan de référence.

Ces phénomènes ont des conséquences spatiales et temporelles qu'il est possible d'exploiter en hydrogéologie. Le marquage isotopique est fonction : i) de la température au sol et donc corrélée à l'altitude ii) de l'éloignement par rapport à la côte iii) de la latitude iv) de la saison. Plus la température est basse, en altitude, moins les molécules lourdes sont gardées dans le nuage : les pluies sont enrichies en isotopes lourds. L'éloignement par rapport à la côte, ou effet de continentalité, est la conséquence de l'appauvrissement relatif du nuage en isotope lourd au fur et à mesure que les pluies le font disparaître de la masse d'air humide. Les pluies des zones continentales proviennent de nuages plus appauvris, elles sont à leur tour plus appauvries en comparaison des pluies côtières. L'effet thermique intervient également en amont

des précipitations sur l'appauvrissement relatif du nuage créé depuis les masses océaniques : lorsque la latitude augmente et que la température de l'eau de condensation baisse, les nuages sont plus pauvres en isotope lourd. De même, en hiver lorsque les températures sont plus froides, les nuages et les pluies qui en proviennent sont plus pauvres en isotopes lourds.

Sur un bassin donné, où l'altitude, la latitude et l'éloignement de la côte sont constants, le marquage isotopique des eaux de pluies va principalement varier de façon saisonnière. Il n'est cependant pas question d'une variation sinusoïdale parfaite compte tenu des multiples paramètres qui influent sur ce signal.

L'estimation du temps de séjour de l'eau dans le massif peut être réalisée par comparaison du signal « eau de pluie » par rapport au signal « eau du karst » à travers l'étude des isotopes ^{18}O et ^{2}H puisqu'ils sont, par définition, conservatifs. Ainsi Perrin et al. (2003) mettent en évidence un séjour de l'eau dans l'épikarst d'au moins quelques mois, sans toutefois quantifier ce temps de séjour. Par une étude des prélèvements en fonction de leur origine dans l'aquifère karstique, Cras (2005) donne des temps de séjour de l'eau variant de plus d'un an dans le réservoir profond, de 10 à 50 semaines dans la proche surface et de seulement quelques semaines à moins de 30 cm de la surface. Enfin, à partir d'un échantillonnage fin et régulier sur deux cycles hydrogéologiques, Lopez (2009) a expliqué les variations du signal de l'eau épikarstique par un mélange entre des eaux récentes (15 jours) et anciennes.

V.1.3 Les équilibres calco-carboniques et le $\delta^{13}C$-CMTD, indicateurs des conditions d'écoulement dans le karst

V.1.3.1 Théorie pour l'étude des équilibres calco-carboniques

La chimie calco-carbonique est au cœur du processus de karstification. L'objectif est de s'appuyer sur les relations calco-carboniques pour préciser les conditions d'écoulement dans la zone non saturée. Nous proposons pour cela d'utiliser les paramètres suivants :

- La PCO_2 équilibrante (PCO_2éq) qui retranscrit l'équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide,
- L'indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) qui traduit l'état d'équilibre entre la phase aqueuse et la phase solide.

- la PCO_2 à saturation (PCO_{2sat}) qui est une valeur particulière de PCO_2éq lorsqu'ISc est égal à zéro. Elle apporte des informations sur la PCO_2 de l'air rencontrée par une eau en transit dans la zone non saturée.

V.1.3.1.1 La PCO_2 équilibrante

Elle représente la PCO_2 pour laquelle la phase liquide serait à l'équilibre avec la phase gazeuse. La PCO_2 équilibrante est la transcription en terme de pression partielle de la concentration en H_2CO_3* dissous (avec H_2CO_3* = CO_2 aqueux + H_2CO_3) afin de faciliter la comparaison directe avec la PCO_2 de l'air dans lequel l'eau évolue. Pour autant il ne s'agit pas toujours de la pression partielle de l'atmosphère avec laquelle l'eau interagit au moment de la mesure mais de l'expression en termes de pression partielle du CO_2 dissous dans l'eau.

Elle est décrite par l'équation 21 suivante à partir des constantes thermodynamique d'équilibre K_0 et K_1 (Peyraube et al., 2012) :

$$\log(pCO_2eq) = \log\left[HCO_3^-\right] - pHmesuré - \log(K_0 * K_1) \qquad (21)$$

V.1.3.1.2 L'indice de saturation vis-à-vis de la calcite

Il permet de caractériser le degré d'équilibre entre les phases liquides et solides. Il définit la capacité de l'eau à dissoudre ou à précipiter de la calcite. Ainsi, si :

- ISc < 0, l'eau est dite sous saturée en calcite et donc agressive pour la phase solide,
- ISc > 0 l'eau est sur saturée et va donc précipiter,
- ISc proche de 0 on parle d'eau saturée et donc à l'équilibre avec les phases solide et gazeuse.

Il joue un rôle dans le contrôle de la vitesse de précipitation ou de dissolution. Delleur (1999) fait état d'une diminution importante de la vitesse de dissolution à partir de ISc=-0,3 jusqu'à ISc=0. De même, les vitesses de précipitation sont faibles en dessous de ISc =0,3. Svensson et al. (1992) précisent que la vitesse maximum de précipitation est atteinte pour ISc=1 mais que des taux de précipitation assez proches sont enregistrés dès ISc=0,5. Pour un indice faible, entre -0,1 et +0,1 les vitesses de précipitation et dissolution de carbonate sont considérées comme suffisamment lentes pour considérer les eaux comme stables, donc à l'équilibre entre les phases. Le calcul de cet indice définit par Langellier en 1936 est donné par l'équation 22 :

$$ISc = \log\left(\frac{\left[CO_3^{2-}\right]*\left[Ca^{2+}\right]}{K_s}\right) = \log\left[CO_3^{2-}\right] + \log\left[Ca^{2+}\right] - \log\left(K_s\right) \qquad (22)$$

L'activité des ions carbonates pouvant être exprimé l'équation 23 :

$$\left[Ca^{2+}\right] = \left[HCO_3^-\right] * \frac{\gamma_{Ca^{2+}}}{2 * \gamma_{HCO_3^-}} \qquad (23)$$

L'ISc peut donc être calculé par les équations 24 et 25 en considérant le pH mesuré et le pH à saturation (pour ISc = 0) :

$$ISc = pH_{mesuré} - pH_{sat} \qquad (24)$$

$$pHsat = \log\left[HCO_3^-\right] + \log\left[Ca^{2+}\right] + \log\left(\frac{K_2}{K_s}\right) \qquad (25)$$

A partir de l'hypothèse d'électro neutralité et d'une origine des carbonates uniquement de milieu calcaire, on peut exprimer l'activité et donc la concentration en calcium en fonction de celle des bicarbonates (équation 26) :

$$\left[Ca^{2+}\right] = \left[HCO_3^-\right] * \frac{\gamma_{Ca^{2+}}}{2 * \gamma_{HCO_3^-}} \qquad (26)$$

On prendra alors i (équation 27) :

$$i = \frac{\gamma_{Ca^{2+}}}{2 * \gamma_{HCO_3^-}} \qquad (27)$$

ISc peut alors être défini par l'équation 28 :

$$ISc = -1 * \log\left(pCO_2 eq\right) + 3 * \log\left[HCO_3^-\right] + \log\left(\frac{K_2 * i}{K_0 * K_1 * K_s}\right) \qquad (28)$$

V.1.3.1.3 Définition et utilisation de la PCO_2 à saturation

Elle intervient quand ISc = 0 et donc quand l'eau est à l'équilibre vis-à-vis de la calcite. On a donc un équilibre entre les phases liquide, gazeuse et solide, soit ISc = 0. La PCO_2sat définie par l'équation 29 :

$$pCO_2sat = 10\text{^}\left(3 * \log\left[HCO_3^-\right] + Log\left(\frac{K_2 * i}{K_0 * K_1 * K_s} \right) \right) \quad (29)$$

Ce paramètre représente la PCO_2 pour laquelle la calcite est à l'équilibre avec l'eau pour une concentration en bicarbonates donnée. Cette valeur est purement théorique et représente l'équilibre entre trois phases quand la PCO_2 équilibrante représente un équilibre entre gaz et liquide. Cette PCO_2sat constitue donc un bon indicateur des propriétés de l'air de la zone non saturée. En effet, Peyraube et al. (2012) définissent ce paramètre comme la PCO_2 minimale que l'eau a rencontré au cours de son infiltration et qui lui permet d'acquérir sa minéralisation à un instant donné.

V.1.3.1.4 Le repère (-log (PCO_2eq) ; ISc)

Son utilisation permet d'estimer les conditions d'écoulement dans le massif. Pour illustrer le potentiel de ce repère, un exemple pour une eau traversant trois milieu (A, B et C) ayant des PCO_2 de l'air différentes telles que PCO_2 B> PCO_2 C > PCO_2A est donné dans la Figure V-3 :

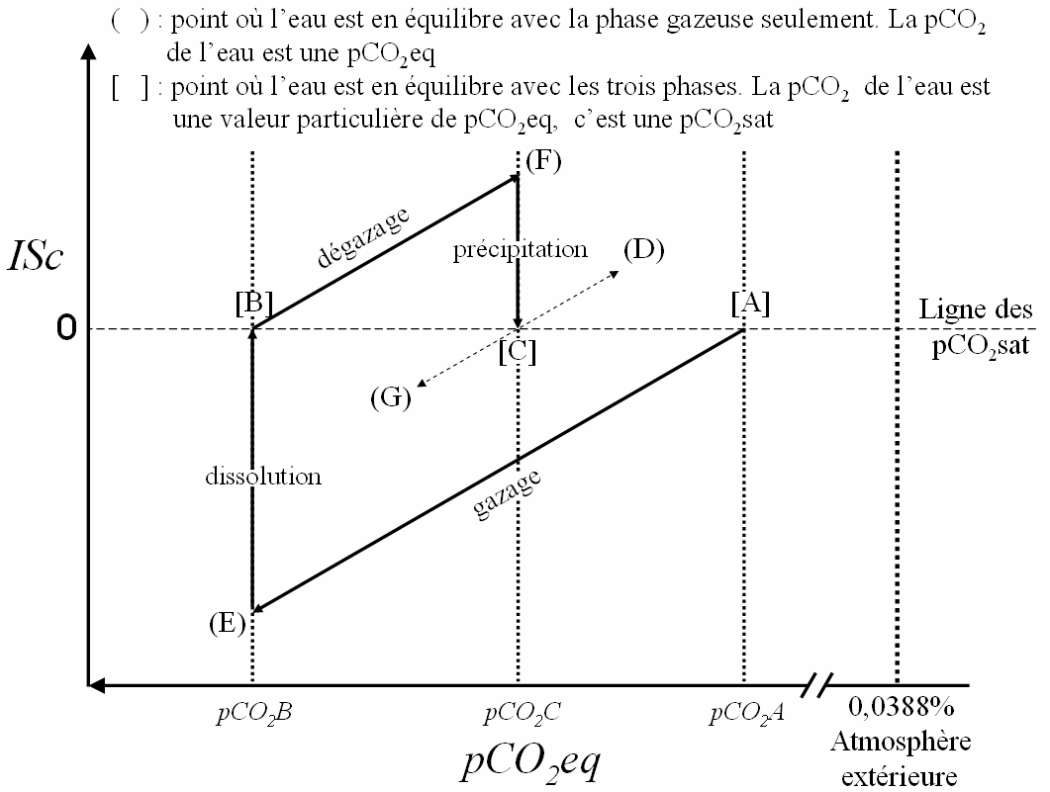


Figure V-3 : Evolution potentielle d'une eau dans le repère (-log(PCO_2eq) ; ISc). Les points [A], [B] et [C] sont des états d'équilibre entre les trois phases (gazeuse-liquide-solide), E et F sont des états transitoires extrêmes. Les points G et D ne sont pas en équilibre avec la calcite et correspondent à la suite de l'évolution de l'eau vers un milieu hypothétique à PCO_2 plus ou moins élevée qu'en [C] (Peyraube (2011).

On observe que pour rejoindre le point B (équilibre avec le milieu B), l'eau (partant du point A) passe par un état extrême suite à son gazage (E). Une dissolution de carbonates est donc nécessaire pour atteindre ISc = 0 au point B. De manière analogue, lors de la mise à l'équilibre de l'eau entre les milieux B et C (point C), l'eau passe en premier lieu par le point extrême F suite au dégazage de CO_2 puis atteint ISc = 0 suite à la précipitation de carbonates. Il est important de noter que les processus de gazage et dégazage se font pour une concentration en bicarbonates constante, et font donc évoluer l'eau sur une droite de pente 1.

V.1.3.1.5 Définition des paramètres intrinsèques à une émergence

La méthode développée par Peyraube et al. (2012) repose sur une approche globale des émergences dans le repère (-log(PCO_2eq) ; ISc). Cette approche est orientée spécifiquement vers l'évolution d'une eau en fonction des processus de variation du Carbone Minéral Total Dissous (CMTD) : évasion et dissolution du CO_2, précipitation et dissolution de carbonate. Elle est présentée en détail du fait de son importance dans nos interprétations.

A partir des mesures (températures, pH, alcalinité), on obtient un nuage de points à partir desquels on peut calculer la PCO_2sat et construire des droites de gazage/dégazage (pente de 1) grâce à l'équation 29. L'ensemble des droites gazage/dégazage permet de créer une droite modèle de gazage/dégazage (G/D). On peut alors calculer pour une température moyenne de l'eau, une concentration modèle en bicarbonates (équation 30) :

$$HCO_3^- \text{ modèle} = \frac{1000 * M_{HCO_3^-}}{\overline{\gamma_{HCO_3^-}}} * 10\text{^}\left(\frac{1}{3} * \left(\overline{ISc}_{mesures} + \log\left(\overline{pCO_2 eq}\right) - \log\left(\frac{\overline{K_2} * \bar{i}}{\overline{K_0} * \overline{K_1} * \overline{K_s}}\right)\right)\right) \quad (30)$$

Cette concentration représente la concentration théorique en bicarbonates pour une eau à température moyenne ne subissant pas de processus de dissolution/précipitation. On peut alors calculer une concentration en bicarbonate pour chaque point de mesure.

La droite modèle G/D n'est pas une régression linéaire du nuage de points mais une droite de pente 1 définie par l'équation 31, dont la partie constante est calculée avec la valeur de HCO_3^-modèle :

$$ISc_{modèle} = -1 * \log\left(pCO_2 eq\right) + 3 * \log\left[HCO_3^- \text{modèle}\right] + \log\left(\frac{\overline{K_2} * \bar{i}}{\overline{K_0} * \overline{K_1} * \overline{K_s}}\right) \quad (31)$$

On peut alors calculer la PCO_2sat modèle, paramètre intrinsèque à l'émergence (équation 32) :

$$pCO_2 \text{sat modèle} = 10\text{^}\left(\overline{ISc}_{mesures} + \log\left(\overline{pCO_2 eq}\right)\right) \quad (32)$$

V.1.3.2 Théorie pour l'étude du signal isotopique du CMTD

Le Carbone 13 est utilisé en hydrogéologie karstique en tant que moyen de détermination de l'origine de l'eau. Doctor et al. (2000) se basent sur la signature isotopique des eaux pour distinguer les apports des eaux infiltrées dans le massif karstique de celles provenant de la surface. Parmi les écoulements provenant du massif karstique, le carbone 13 permet de quantifier les apports de la zone non saturée et de la zone saturée (Emblanch et al. 1998, 2003 ; Batiot et al. 2003). D'autres auteurs présentent une utilisation du carbone 13 pour ajuster la datation des eaux (Gonfiantini et Zuppi, 2003) ou pour l'étude des paléoclimats (Genty et al. 2006).

Le $\delta^{13}C$ du CMTD est la résultante des $\delta^{13}C$ des espèces carbonatées pondérées par leur participation au CMTD (équation 13).

$$\delta^{13}C_{CMTD} = a_0 * \delta^{13}C_{H2CO3} + a_1 * \delta^{13}C_{HCO3} + a_2 * \delta^{13}C_{CO3} \quad (33)$$

$$\text{Avec } a_0 = \frac{H2CO3}{CMTD} \text{ et } a_1 = \frac{HCO3}{CMTD} \text{ et } a_2 = \frac{CO3}{CMTD}$$

Chaque changement de phase et de forme de carbone minéral dissous entraîne un fractionnement différent qui peut être calculé grâce aux équations présentées dans le Tableau V-1.

Tableau V-1 : Facteurs de fractionnement du $\delta^{13}C$ pour les différentes formes de carbone en fonction de la température T en °Kelvin.

Facteur de fractionnement	Equation	Référence
$\varepsilon\ ^{13}C_{CO2(aq)\text{-}CO2(g)}$	$10^3 \ln\alpha\ ^{13}C_{CO2(aq)\text{-}CO2(g)} = -0{,}373\ (10^3\ T^{-1}) + 0{,}19$	(VOGEL et *al.*,1970)
$\varepsilon\ ^{13}C_{HCO3(aq)\text{-}CO2(g)}$	$10^3 \ln\alpha\ ^{13}C_{HCO3(aq)\text{-}CO2(g)} = 9{,}552\ (10^3\ T^{-1}) - 24{,}10$	(MOOK et *al.*, 1974)
$\varepsilon\ ^{13}C_{CO3(aq)\text{-}CO2(g)}$	$10^3 \ln\alpha\ ^{13}C_{CO3(aq)\text{-}CO2(g)} = 0{,}87\ (10^6\ T^{-2}) - 3{,}4$	(DEINES et *al.*, 1974)
$\varepsilon\ ^{13}C_{CO2(g)\text{-}CaCO3}$	$10^3 \ln\alpha\ ^{13}C_{CO2(g)\text{-}CaCO3} = -2{,}9888\ (10^6\ T^{-2}) + 7{,}6663\ (10^3\ T^{-1}) - 2{,}4642$	(VOGEL et *al.*,1970)

Avec ε (enrichissement) = 10^3 ln α (coefficient de fractionnement)
Et $\varepsilon\ ^{13}C_{b\text{-}a}$ du composé (a) vers le composé (b).

Ainsi, pour une eau bicarbonatée calcique à 12°C (285 °K), circulant dans un sol dont le CO_2 affiche un signal isotopique de -22‰, l'évolution des teneurs en $\delta^{13}C$-CMTD est décrite par la Figure V-4.

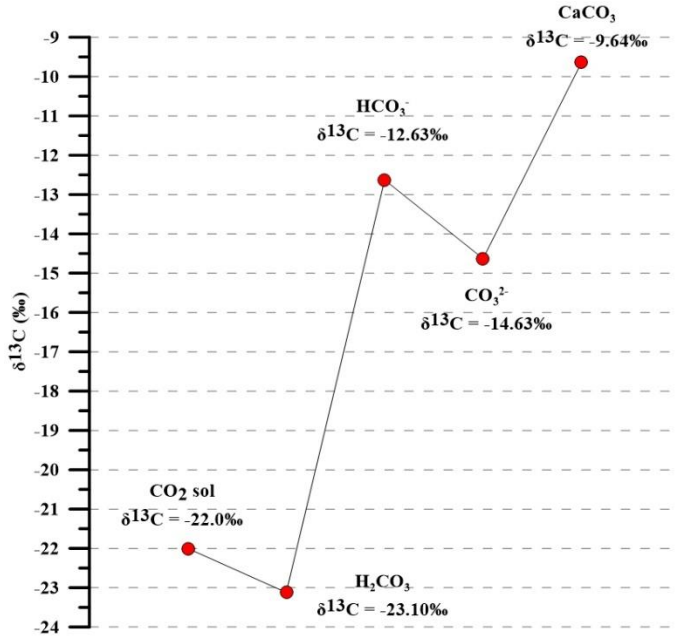


Figure V-4 : $\delta^{13}C$ des différentes formes du système calco-carbonique (modifiée d'après Lopez, 2009).

Le marquage de l'eau correspond alors au mélange des différentes formes du CMTD et dépend donc directement du pH de la solution (Clark & Fritz, 1997). Dans le système de Lascaux, les variations du pH de l'eau suite aux processus de gazage, dégazage, dissolution et précipitation de calcite au cours de son infiltration, seront donc les principaux facteurs de la variation du $\delta^{13}C$ du CMTD. Ces processus provoqueront dans le cas :

- D'un dégazage, un enrichissement du CMTD dû à une nouvelle répartition des formes du CMTD (perte de la forme appauvrie H_2CO_3).
- D'une précipitation, un enrichissement dû à une augmentation de la forme du CMTD la plus présente (HCO_3^-).
- D'un gazage, un appauvrissement dû à l'incorporation de CO_2 de l'air appauvri en ^{13}C du fait de son origine biogénique.
- D'une dissolution, un enrichissement dû à la mise en solution de carbonates enrichis en ^{13}C.

La variabilité de ce paramètre sera donc un indicateur, tout comme les équilibres calco-carboniques, des conditions d'écoulement rencontrées par l'eau au cours de son infiltration à travers la zone vadose.

V.2 Matériel et méthode : suivi en continu et ponctuel de l'hydrogéochimie des eaux de la zone vadose

Au cours de ces trois années de thèse, différents types d'eau ont été prélevés et analysés pour permettre la détermination du signal chimique des eaux entrant dans les sols (pluies), entrant dans l'épikarst (eau du sol), sortant de l'épikarst (émergence du SAS 1) et émergeant de la zone de transmission (source de la Haute Fageotte). Cependant, les réponses rapides du système épikarstique de Lascaux aux sollicitations pluvieuses rendent difficile l'étude fine des conditions d'écoulement à travers seulement une stratégie d'échantillonnage ponctuel. Pour atteindre un niveau de détails suffisant, il a donc été entrepris de développer et d'implanter un dispositif de suivi en continu des paramètres physico-chimiques intrinsèques de l'eau ainsi que de sa fluorescence à 370 nm (COD). L'objectif de cette sous-partie est donc de présenter le suivi ponctuel des différents types d'eau étudiés mais aussi du dispositif de monitoring en continu de l'émergence épikarstique du SAS 1. Nous précisons dès maintenant que le débit des écoulements au SAS 1 est mesuré en continu comme évoqué précédemment. A contrario, le débit de la Haute Fageotte n'est pas mesuré du fait des difficultés techniques (écoulements diffus).

V.2.1 Suivis ponctuels des eaux de la zone vadose

V.2.1.1 Les différents types d'eau et les paramètres hydrogéochimiques et isotopes étudiés

Les pluies ont été suivies hebdomadairement grâce au concours des agents de la Grotte de Lascaux. Ainsi, un prélèvement représentant le cumul hebdomadaire des pluies tombées sur le site de Lascaux a été effectué d'Octobre 2013 à Septembre 2016. Les eaux sont récupérées en sortie du pluviomètre à augets implanté au-dessus de la cavité. Ces dernières sont ensuite conduites dans un bidon de récupération. Ce bidon est contenu dans une glacière pour éviter la contamination et l'évaporation de l'eau de pluie qui entrainerait une modification des signaux chimiques et isotopiques. Les échantillons prélevés sont ensuite conservés au froid avant les analyses en laboratoires des ions majeurs et des isotopes de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$).

Les eaux sortant du compartiment sol en direction de l'épikarst sont récupérées à l'aide d'une plaque en inox de 50 cm² implantée verticalement à l'interface entre calcisols leptiques (sol de la parcelle expérimentale) et calcaires délités de l'épikarst à une profondeur de 40 cm. Les eaux récupérées suite aux sollicitations pluvieuses sont ensuite stockées dans un flacon hermétique conservé dans le sol (Figure V-5). Les échantillons prélevés sont ensuite

conditionnés et conservés avant analyse en laboratoire des ions majeurs, de la silice dissoute, du COD et du δ^{13}C-CMTD. Les mesures isotopiques ont été effectuées sur un petit nombre d'échantillons. En effet, ces prélèvements représentent un cumul des eaux du sol s'infiltrant suite aux pluies. Seuls les échantillons pour lesquels le conditionnement a été effectué peu de temps après l'écoulement des eaux en sortie du sol seront considérés pour garantir une bonne représentativité du δ^{13}C-CMTD de l'eau du sol. Les prélèvements ayant été réalisés plusieurs jour après l'occurrence des infiltrations ne seront donc pas analysées pour déterminer ce signal isotopique.

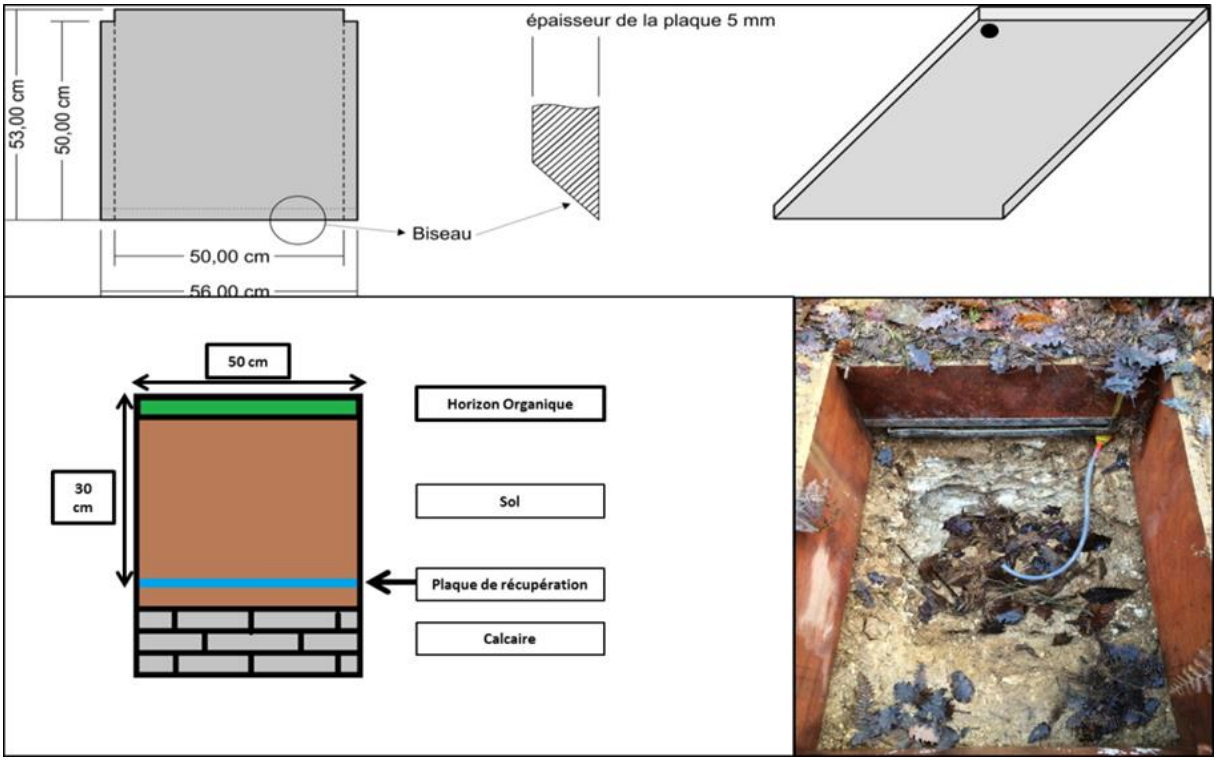


Figure V-5 : Dispositif de récupération des eaux s'infiltrant du sol vers l'épikarst.

Les eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 ont été prélevées de façon hebdomadaire pour les cycles 2013-2014 et 2014-2015 puis deux à trois fois par semaine pour le cycle 2015- 2016. Au cours de ces prélèvements, des mesures in-situ de l'alcalinité (titrimètre manuel de terrain Hach Lange) du pH, de la conductivité et de l'oxygène dissous sont effectuées à l'aide de sondes de la marque WTW couplées à un multimètre WTW 3430. L'alcalinité retranscrit dans notre contexte, la concentration en ions HCO_3^- de l'eau. Parallèlement, des échantillons sont récupérés et immédiatement conditionnés puis conservés à une température de 5°C. Ils permettent les analyses en laboratoire des ions majeurs, de la silice dissoute, du DOC, des isotopes de la molécule d'eau (δ^{18}O et δ^{2}H) et du CMTD (δ^{13}C-CMTD).

Les mêmes paramètres chimiques et isotopiques sont mesurés in-situ et analysés pour les eaux de l'émergence de la Haute Fageotte. Cette source est prélevée toutes les semaines en période de crues (hiver et printemps). Les prélèvements sont plus espacés au cours du temps en conditions d'étiage, avec en moyenne un prélèvement bihebdomadaire ou mensuel.

V.2.1.2 Analyses en laboratoire

Les mesures de concentration en cations (sodium, ammonium, potassium, magnésium et calcium) et anions (fluorure, chlorures, nitrite, sulfate, nitrate, phosphate) sont réalisées sur un chromatographe Dionex ICS 1500. Il est muni de colonnes AS15 pour les anions et CS12 pour les cations. Pour les anions, nous utilisons une colonne AS15 et un éluant à base de soude (KOH). Pour les cations, nous utilisons une colonne CS12 et un éluant à base d'acide méta-sulfonique. L'incertitude sur la mesure est estimée à 2% par les tests de répétitivité effectués sur les échantillons. Les concentrations en **Silice dissoute (SiO_2d)** sont obtenues par colorimétrie avec l'heptamolybdate (Strickland et Parsons, 1972) avec un pourcentage d'erreur inférieur à 5%.

L'analyse du **carbone organique dissous (COD)** suit le principe de l'oxydation thermique. L'échantillon, acidifié sur le terrain puis bullé à l'oxygène pur au laboratoire, est injecté à l'aide d'une seringue dans l'analyseur Shimadzu® TOC 500. Il est introduit dans un tube chauffé à 680°C contenant un catalyseur. Ce dernier agit comme un oxydant et les composés de combustion et de dégradation sont transformés en CO_2, analysés par détection infrarouge et quantifiés à l'aide d'une courbe d'étalonnage. Le bullage de l'échantillon permet de dégazer le CO_2 en excès dans l'échantillon suite à l'acidification sur le terrain mais aussi à la présence de carbone inorganique dans la solution.

Le **δ^{13}C-CMTD** a été mesuré de deux façons différentes au cours de ces trois années de thèse. Pour les échantillons des cycles 2013-2014 et 2014-2015, le δ^{13}C-CMTD est mesuré à partir de la procédure définie par Gillikin et Bouillon (2007). Un volume de tête est réalisé sur le flacon sérum serti de 120 mL en injectant 25 mL d'hélium pur remplaçant l'échantillon. 0,3 mL d'acide phosphorique à 85% sont ensuite ajoutés pour passer l'ensemble du DIC en CO_2 qui diffusera ensuite dans le headspace lors de l'agitation. La mesure du δ^{13}C-DIC est réalisée par un spectromètre de masse couplé à un analyseur élémentaire Isoprime. Pour la mesure, 2 mL de gaz provenant du headspace sont injectés. Le rapport isotopique du carbone est exprimé sous forme d'un delta relatif à la référence du Pee Dee Belemnite. Les valeurs de ce delta ont

été calibrées à partir d'un standard réalisé par dissolution de 45 mg de Na_2CO_3 avec 3 mL d'acide phosphorique à 85% dans un flacon sérum de 120 mL précédemment rempli d'hélium pur. Ce standard a lui-même été calibré à partir d'un standard certifié (NBS19, -1,96‰) en utilisant un spectromètre de masse à deux entrées. La valeur du standard confectionné par nos soins est de -4,5±0,2‰. Afin de réaliser une correction du partitionnement du CO_2 entre l'headspace et la phase liquide et afin de calculer le $\delta^{13}C$ du DIC total, le fractionnement isotopique du CO_2 à l'interface eau-air a été appliqué en fonction de la température du laboratoire (Miyajima et al., 1995). L'incertitude moyenne liée à cette mesure est estimée à 3%. Pour le cycle hydrogéologique 2015-2016, les échantillons ont été analysés par la plateforme d'analyses isotopiques SHIVA (Laboratoire ECOLAB de l'ENSAT, Toulouse). Les échantillons ont subi une attaque acide par de l'acide orthophosphorique purifié, ce qui produit le dégagement du carbone inorganique dissous sous forme de CO_2 qui est ensuite piégé et purifié et par la suite analysé par spectrométrie de masse. Le résultat est ainsi donné avec une précision de ±0.2‰.

Le **$\delta^{18}O$ de l'eau** est mesuré en phase gazeuse après mise à l'équilibre de la solution à analyser avec une phase gazeuse constituée de CO_2 (Clark et Fritz, 1997). Cette étape d'équilibration entre eau et gaz est nécessaire pour permettre une mesure par spectrométrie de masse à source ionique. En effet, ce type d'appareillage est sensible à la condensation et ne permet donc pas d'effectuer la mesure directement à partir de l'échantillon aqueux. Pour accélérer la mise à l'équilibre, le pH de la solution est abaissé en dessous de 4.5 par adjonction d'un acide fort. La valeur du $\delta^{18}O$ de l'eau est alors dérivée de celle du CO_2 avec lequel elle était à l'équilibre. Le coefficient de fractionnement résultant de ce changement de phase a été étudié par de nombreux auteurs. Actuellement, le coefficient de fractionnement moyen utilisé est de 1.0412 (Friedman et O'Neil, 1977). La précision moyenne est alors inférieure à ±0.1‰.

Le **$\delta^{2}H$ de l'eau** est mesuré par réduction de l'eau en hydrogène (H_2) par utilisation du zinc (Florkowski, 1985). Etant donné que toute l'eau est transformée en hydrogène, il n'est pas nécessaire d'appliquer de corrections relatives à un coefficient de fractionnement isotopique. L'erreur d'analyse est inférieure à ±0.5‰.

V.2.2 Développement du monitoring en continu des paramètres hydrochimiques de l'émergence épikarstique du SAS 1

V.2.2.1 Contraintes liées au site d'étude

Le site de la Grotte de Lascaux offre une fenêtre d'observation intéressante sur les écoulements épikarstiques. Cependant, la configuration du site de mesure (Figure V-6) impose des contraintes techniques spécifiques liées aux écoulements par égouttement aux stalactites du plafond du SAS 1 compartiment 3. Les variations brusques du débit de cette émergence amènent elles aussi leur lot de difficultés.

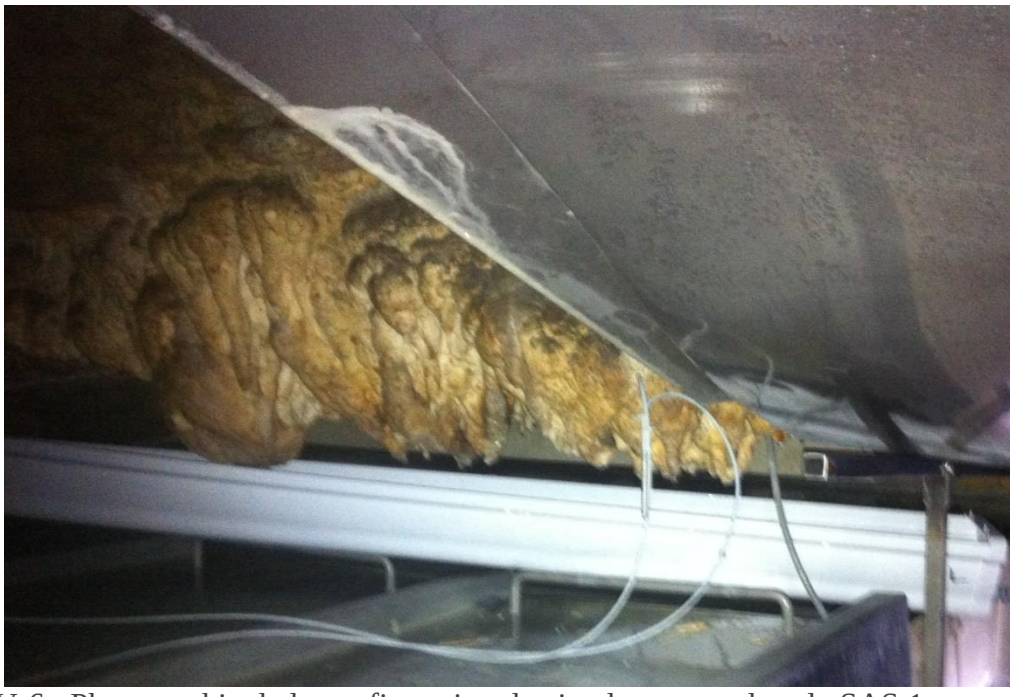


Figure V-6 : Photographie de la configuration du site de mesure dans le SAS 1 compartiment 3.

Ainsi, le développement de ce dispositif devait répondre aux contraintes techniques suivantes :

- intercepter suffisamment d'écoulements sans provoquer un dégazage important du CO_2 dissous par éclatement des gouttes,
- créer un système de faible encombrement,
- créer une cuve de mesure suffisamment grande pour accueillir les quatre sondes prévues sans toutefois comporter un volume dont le renouvellement serait trop lent,
- créer un système permettant de s'affranchir de bulles d'air dans le tube amenant l'eau au fluorimètre,

- gérer les variations assez importantes du débit de l'écoulement recueilli pour ne pas entrainer des écoulements en direction de la partie ornée de la cavité.

V.2.2.2 Description du dispositif de suivi en continu

Pour cela, une gouttière en PVC de 2 mètres de longueur et 0,2 mètre de largeur préalablement rincée à l'eau ultra-pure a été placée sous les stalactites les plus productives en minimisant au maximum la hauteur de chute des gouttes d'eau (Figure V-6), ceci pour restreindre au maximum le dégazage du CO_2 lors de l'éclatement des gouttes d'eau. L'eau récupérée est amenée à la cuve de mesure puis vers le fluorimètre. Pour éviter que des bulles d'air ne passent dans le tuyau menant au fluorimètre, le niveau d'eau dans la cuve de mesure devait être contraint de manière à ce qu'il soit toujours situé au-dessus de la sortie. Pour cela, une cuve supplémentaire est placée en sortie du système à une hauteur supérieure à celle de la sortie de la cuve. Enfin, pour gérer les variations de débit importantes et très rapides de cet écoulement épikarstique, il a été nécessaire d'ajouter un bac de récupération du trop-plein en dessous de la cuve de mesure. Le système complet est présenté en Figure V-7.

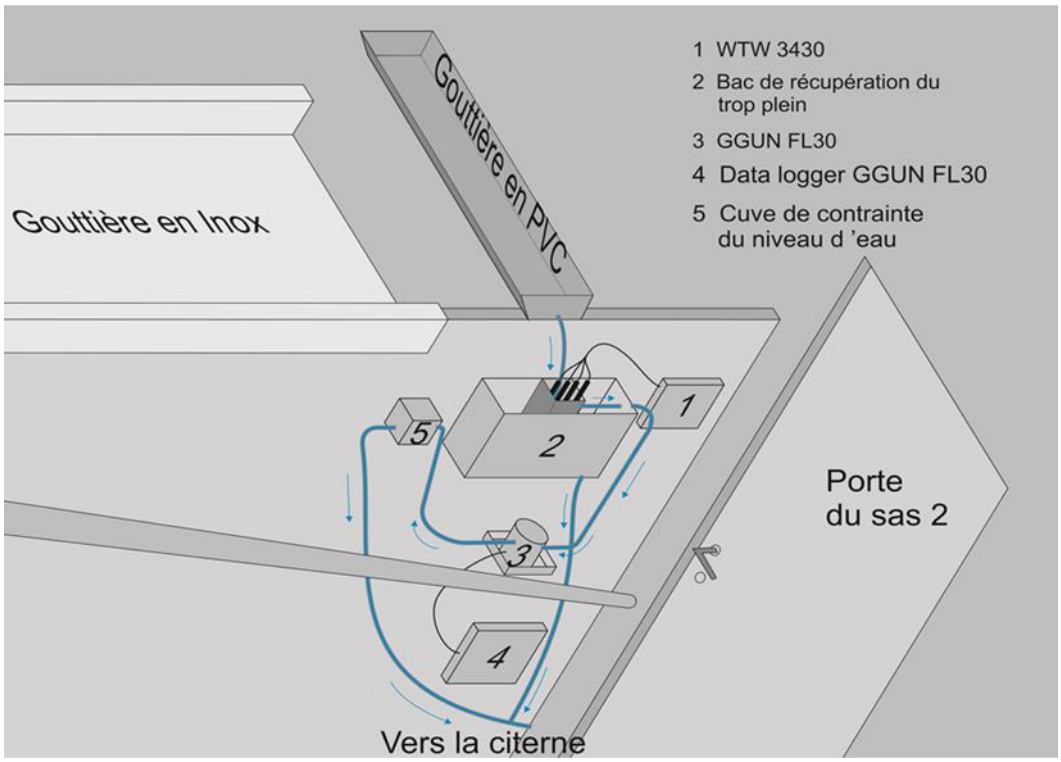


Figure V-7 : Schéma du dispositif de suivi en continu des paramètres physico-chimiques et de la fluorescence à 370 nm de l'eau de l'émergence épikarstique du SAS 1.

La mise en place du dispositif de mesure en continu à l'émergence du SAS 1 a été effectuée avant le début de la reprise des écoulements de chaque cycle hydrogéologique. Ce dispositif de suivi enregistre toutes les 15 minutes les paramètres suivants :

- les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous. Ces enregistrements sont réalisés par des sondes de la marque WTW couplées à deux multimètres WTW 3430 qui enregistre les mesures toutes les 15 minutes. Ces sondes sont étalonnées toutes les semaines,
- la fluorescence de la matière organique grâce au Fluorimètre GGUN-FL30 de la société Albillia, qui permettra la détermination du COD grâce à la mesure réalisée dans le domaine de l'ultra-violet (λ=370 nm).

V.3 Etude des conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst de la colline de Lascaux : apports du suivi des traceurs naturels et isotopiques

Cette section a pour objectif de présenter les principaux résultats obtenus à l'aide du suivi ponctuel des différents types d'eau de la zone vadose mais aussi et surtout du suivi en continu de l'émergence épikarstique du SAS 1.

Pour cela, les données hydrogéochimiques et isotopiques à notre disposition seront présentées. Les conditions d'écoulements dans les compartiments épikarstiques et de la zone de transmission seront ensuite discutées avant de détailler leurs impacts sur les équilibres calco-carboniques des eaux transitant dans la zone vadose superficielle.

Les différents suivis ont ainsi été réalisés pour les cycles hydrogéologiques 2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016. Ces trois cycles présentent des caractéristiques d'écoulement bien différentes entre eux avec deux cycles excédentaires en 2013-2014 et 2015-2016 quand le cycle 2014-2015 a été particulièrement déficitaire en pluie et donc en écoulements.

V.3.1 Les données hydrogéochimiques et isotopiques disponibles

La présentation des données est divisée en trois parties avec en premier lieu la description de la chimie et de l'isotopie des eaux de pluie, suivie de celle des eaux du sol et enfin des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 ainsi que de la source de la Haute Fageotte. Les données brutes sont présentées pour chaque point de prélèvement en **Annexe 9** et **Annexe 10**.

V.3.1.1 La chimie et l'isotopie des pluies

Au cours des trois années de thèse, ce sont plus de 110 prélèvements de pluie qui ont été effectués sur le site de la cavité de Lascaux. Les résultats des analyses par chromatographie ionique sont présentés en Figure V-8. Les statistiques décrivant ces différents éléments chimiques sont présentées dans le Tableau V-2.

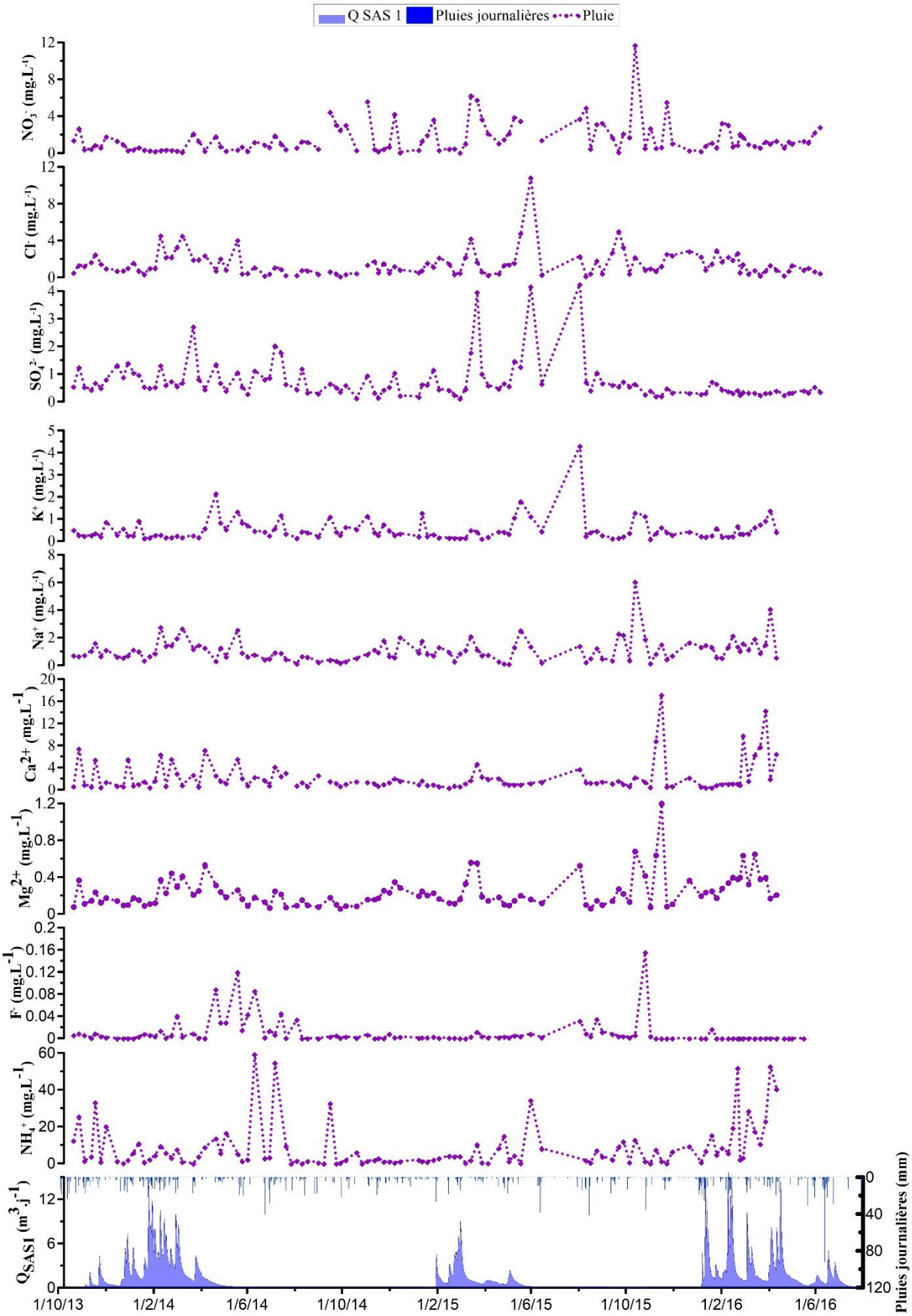


Figure V-8 : Evolution des différents éléments majeurs retrouvés dans les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée.

Tableau V-2 : Statistiques descriptives des différents éléments chimiques majeurs retrouvés dans les pluies sur le site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Point de prélèvement	**Statistiques**	**Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)**	**Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)**	**Na^{+} ($mg.L^{-1}$)**	**K^{+} ($mg.L^{-1}$)**	**SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)**	**Cl^{-} ($mg.L^{-1}$)**	**NO_3^{-} ($mg.L^{-1}$)**	**F^{-} ($mg.L^{-1}$)**
Pluviomètre	*Moyenne*	2.27	0.23	1.10	0.52	0.74	1.46	1.95	0.01
	Maximum	17.19	1.20	6.06	4.31	4.25	10.87	12.1	0.16
	Minimum	0.35	0.05	0.11	0.10	0.12	0.13	0.08	0.00
	Ecart type	2.74	0.17	0.84	0.53	0.71	1.40	4.16	0.02
	Cv (%)	121%	74%	76%	102%	96%	96%	396%	241%

Les eaux recueillies présentent des concentrations moyennes en éléments majeurs faibles soulignant un faible impact d'éventuelles pollutions atmosphériques d'origine anthropique. Néanmoins, les teneurs en Ca^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, F^{-} et NO_3^{-} montrent des valeurs ponctuellement importantes notamment au cours des orages des étés 2014 et 2015. Ces concentrations anormalement élevées pourraient donc être expliquées par des pollutions des échantillons suite aux salissures présentes dans le réceptacle du pluviomètre. Il en est de même pour les concentrations en NH_4^{+} qui sont certainement dues par la présence d'insectes dans le système de prélèvement. Ces valeurs ne seront donc pas considérées comme représentatives de la chimie des eaux de pluie.

Parallèlement, les isotopes de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$) ont été analysés pour les 114 prélèvements à notre disposition. L'évolution de ces valeurs isotopiques ainsi que celle de l'excès en deutérium sont présentées en Figure V-9. L'excès en deutérium marque l'origine locale des pluies par évaporation des eaux (excès de deutérium > 10). Ce dernier est calculé à partir de l'équation 34. Il présente généralement une évolution saisonnière connue (excès plus important en été), il pourrait donc permettre de préciser les temps de transfert dans la zone vadose.

$$Excès\ en\ deutérium\ (‰) = 8 * \delta^{18}O - \delta^{2}H \qquad (34)$$

Le Tableau V-3 résume les statistiques décrivant la variabilité de ces différents isotopes dans les eaux de pluie d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

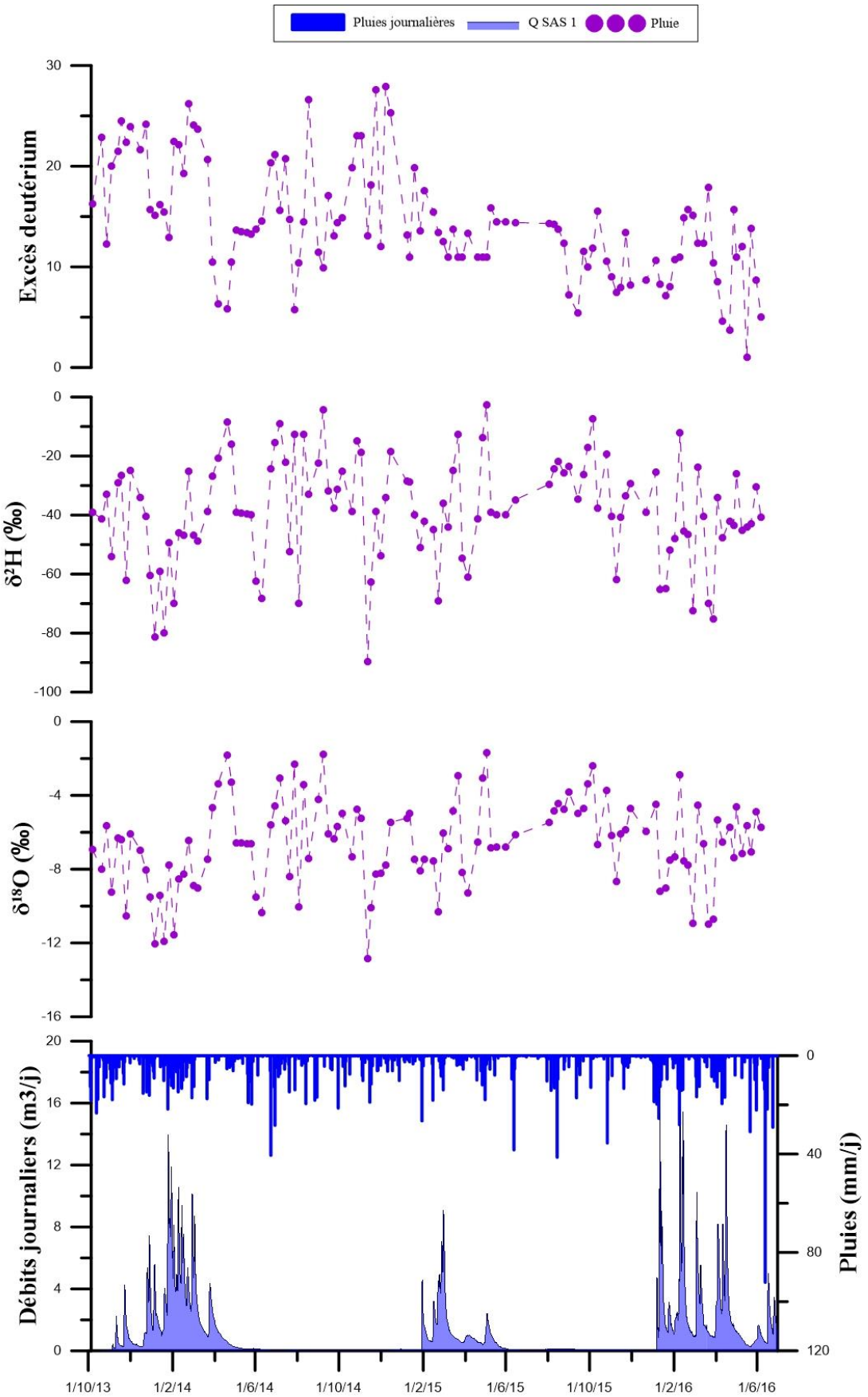


Figure V-9 : Evolution des différents isotopes de la molécule d'eau ainsi que de l'excès de deutérium pour les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée.

Tableau V-3 : Statistiques descriptives des différents isotopes de la molécule d'eau ainsi que de l'excès de deutérium pour les pluies du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Statistiques	**Pluie**		
	$\delta^{18}O$ (‰)	**$\delta^{2}H$ (‰)**	**Excès ^{2}H**
Moyenne	-6.62	-38.61	14.38
Maximum	-1.70	-2.61	27.89
Minimum	-12.84	-89.68	1.04
Ecart type	2.37	17.93	5.61
Cv (%)	36%	46%	39%

Les valeurs de $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ montre des valeurs minimales (appauvries) respectivement de -12.84 et -89.68‰ et maximales (enrichies) de -1.70 et -2.61‰. L'excès en deutérium évolue quant à lui de 1.04 à l'hiver 2016 (peu de remobilisation d'eau local par évaporation dans les eaux de pluie), à 27.89‰ durant l'été 2014 (pluies d'origine locale alimentée par l'évaporation locale des eaux de surface). Les valeurs moyennes sont respectivement de -6.62, -38.61 et 14.38‰ pour le $\delta^{18}O$, le $\delta^{2}H$ et l'excès en deutérium. Les valeurs de $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ sont introduites dans le repère $\delta^{2}H=f(\delta^{18}O)$ en Figure V-10. La droite météorique locale (DML) est alors déterminée et comparée à la droite météorique mondiale (DMM) (équation 35).

$$\delta^{2}H(‰) = 8 * \delta^{18}O + 10 \qquad (35)$$

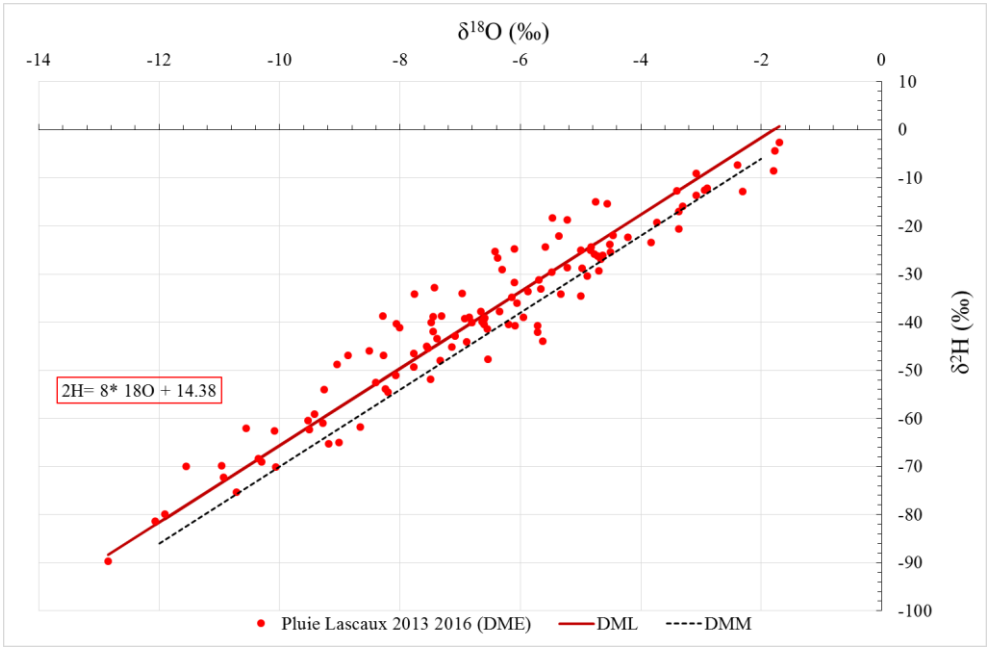


Figure V-10 : Comparaison des mesures isotopiques des pluies et de la droite météorique locale (DML) avec la droite météorique mondiale (DMM) dans le repère $\delta^{2}H=f(\delta^{18}O)$.

La DML montre une légère déviation vis-à-vis de la DMM montrant un excès en deutérium moyen de 14.38‰ supérieur à celui de la DMM (10‰). Ainsi, ces mesures montrent

clairement l'origine océanique des précipitations avec néanmoins une influence importante de la réévaporation des eaux continentales au cours des orages estivaux.

V.3.1.2 La chimie des eaux du sol

Au total, 30 prélèvements ont pu être effectués grâce au lysimètre implanté à l'interface entre calcisols leptiques et calcaires délités de l'épikarst. L'évolution des concentrations en éléments majeurs, silice dissoute et COD est présentée dans la Figure V-11. Le Tableau V-4 permet de décrire statistiquement les teneurs des éléments chimiques analysés dans ces échantillons.

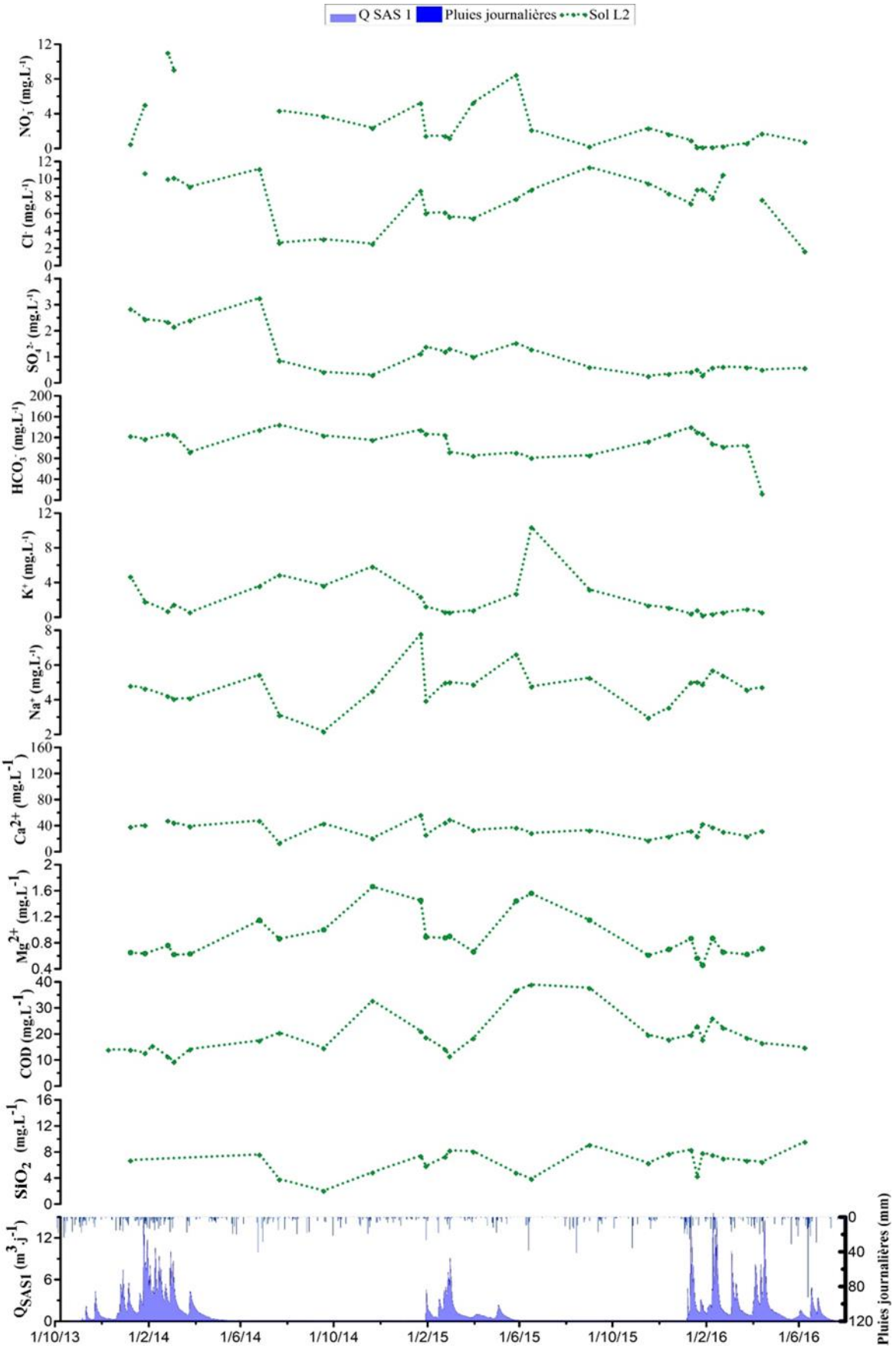


Figure V-11 : Evolution des différents éléments majeurs, silice dissoute et COD retrouvés dans les eaux des calcisols du site de Lascaux d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée.

Tableau V-4 : Principales valeurs statistiques décrivant les concentrations en ions majeurs, l'alcalinité (HCO_3^-) ainsi que la silice dissoute et le DOC mesurées dans les échantillons d'eau du sol entre Octobre 2013 et Juillet 2016.

Point de prélèvement	**Statistiques**	**HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)**	**Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)**	**Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)**	**Na^+ ($mg.L^{-1}$)**	**K^+ ($mg.L^{-1}$)**	**SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)**	**Cl^- ($mg.L^{-1}$)**	**NO_3^- ($mg.L^{-1}$)**	**SiO_2 ($mg.L^{-1}$)**	**COD ($mg.L^{-1}$)**
Sol	*Moyenne*	111.35	35.14	0.88	4.71	2.15	0.52	7.21	2.14	6.67	20.07
	Maximum	145.00	56.86	1.66	7.80	10.39	3.26	13.14	8.49	9.61	39.00
	Minimum	81.2	13.45	0.46	2.19	0.22	0.27	1.68	0.15	2.07	9.36
	Ecart type	26.54	10.63	0.32	1.09	2.27	0.44	2.91	2.12	1.81	7.89
	Cv (%)	24%	30%	37%	23%	105%	85%	40%	99%	27%	39%

L'analyse des statistiques et évolution des différents paramètres permet les observations suivantes :

- Les nitrates : concentrations évoluant entre 0.15 et 8.49 $mg.L^{-1}$ pour une valeur moyenne de 2.14 $mg.L^{-1}$. Les concentrations les plus élevées sont au cours des printemps 2014 et 2015, les plus basses au cours de l'hiver et du printemps 2016.
- Les chlorures : concentrations comprises entre 1.68 et 13.64 $mg.L^{-1}$ pour une valeur moyenne de 7.21 $mg.L^{-1}$. Les valeurs les plus basses sont observées durant l'automne 2014 quand les plus élevées sont retrouvées durant l'été et l'automne 2015. Le principal facteur responsable de la variabilité du signal Cl^- semble être la remobilisation de cet élément chimique suite à des sollicitations pluvieuses intervenant successivement à une période de faible pluviométrie (concentration dans les sols suite à l'évapotranspiration de l'eau), mais aussi la variabilité de la concentration en Cl^- dans les pluies.
- Les sulfates : concentrations comprises entre 0.27 et 3.26 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne de 0.52 $mg.L^{-1}$ légèrement inférieure à celle des pluies (0.74 $mg.L^{-1}$). Les plus fortes teneurs sont observées au cours de l'hiver 2014. Des concentrations plus faibles sont ensuite mesurées au cours de l'été 2014 avant une augmentation au cours de l'hiver et du printemps 2015 suivie à nouveau d'une baisse en fin d'été 2015 ou les concentrations évoluent entre 0.5 et 1.0 $mg.L^{-1}$.
- Le potassium : concentrations comprises entre 0.22 et 10.39 $m.L^{-1}$ avec une moyenne de 2.15 $mg.L^{-1}$. Les concentrations suivent globalement une tendance saisonnière avec des valeurs élevées en été et en automne et faibles au cours de l'hiver et du printemps.
- Le sodium : concentrations s'étalant de 2.19 à 7.80 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne de 4.71 $mg.L^{-1}$. La variabilité saisonnière est semblable à celle du potassium.
- Le magnésium : concentrations comprises entre 0.46 et 1.66 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne de 0.88 $mg.L^{-1}$. La variabilité saisonnière de la concentration de l'eau du sol en magnésium est clairement impactée par les périodes de forte pluviométrie au cours desquelles les valeurs chutent. A contrario, ces dernières sont plus élevées en été lorsque la pluviométrie est moins importante.
- Le couple calcium bicarbonate : les concentrations relevées sont cohérentes avec les informations données par Poulenard (2014) qui relève la présence de débris de calcaire épikarstique dans ce type de sol. La dissolution du CO_2 fortement concentré dans l'air du sol à certaines périodes de l'année permet l'acquisition de cette minéralisation carbonatée calcique.

- Le COD : concentrations comprises entre 9.36 et 39.00 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne de 20.07 $mg.L^{-1}$. La variabilité saisonnière est aussi clairement marquée pour cet élément et semble suivre celle du magnésium.
- La silice dissoute : concentrations s'étalant de 2.7 à 9.61 mg.L-1 pour une moyenne de 6.67 $mg.L^{-1}$.

Remarque : Les trois mesures de δ^{13}C-CMTD non présentées dans le Tableau V-4 et la Figure V-11 précédente montre des valeurs de -22.37 ‰ en été (Juillet 2014), à -15.98‰ en fin d'été (Septembre 2015) et -15.46‰ en hiver (Février 2016). Ainsi, le signal isotopique du δ^{13}C-CMTD est particulièrement influencé par les fortes PCO_2 de l'air du sol mesurées à cette époque de l'année (Cf. Chapitre 3), quand il semble plutôt montrer une proportion plus importante en HCO_3^- dans les eaux au cours de l'hiver et de la fin de l'été suite à la dissolution des carbonates présents dans les sols. Ainsi, ces eaux paraissent sous-saturées vis-à-vis de la calcite en été, et plus proche de l'équilibre au cours de l'hiver et de la fin de l'été du fait de la plus faible PCO_2 de l'air du sol.

La comparaison des différentes concentrations de certains des traceurs naturels du temps de séjour et de l'origine de l'eau dans le karst permettra d'affiner nos interprétations quant à l'influence des conditions d'écoulement dans le compartiment épikarstique en ciblant les éléments chimiques impactés au cours de leur infiltration.

V.3.1.3 La chimie et l'isotopie des eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte

Deux écoulements de zone non saturée du karst de la colline de Lascaux ont été suivis au cours des trois années de thèse :

- L'émergence épikarstique non pérenne du SAS 1 : 109 prélèvements au cours des périodes d'écoulement des cycles hydrogéologiques 2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016,
- La source pérenne de la Haute Fageotte : 65 prélèvements d'Octobre 2013 à Juin 2016.

Les différentes dates de prélèvement sont reportées sur l'hydrogramme de l'émergence épikarstique du SAS 1 pour visualiser la répartition temporelle de ces derniers. A titre de comparaison, les prélèvements de la source de la Haute Fageotte ont aussi renseigné dans la Figure V-12. La Figure V-13 présente quant à elle l'évolution des différents éléments chimiques analysés suite aux prélèvements. Les statistiques descriptives sont résumées dans le Tableau V-5.

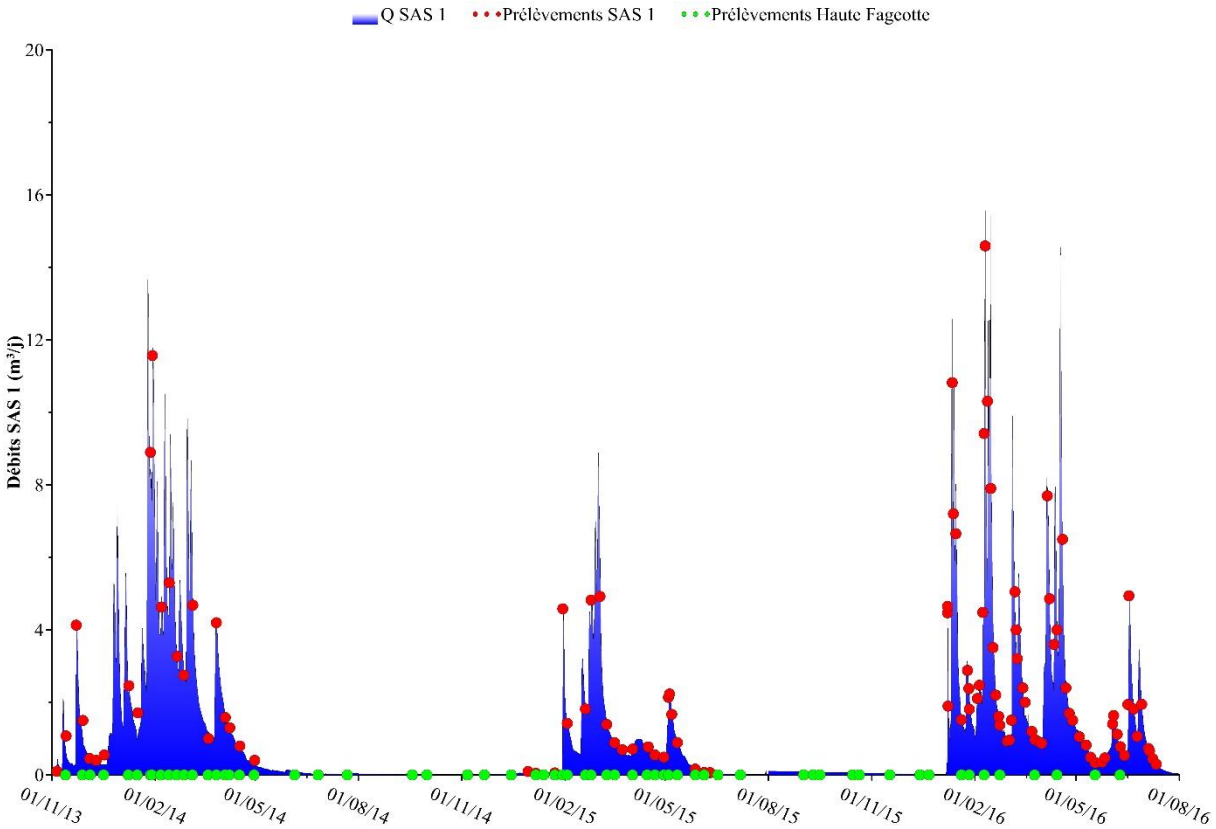


Figure V-12 : Dates de prélèvements de l'émergence épikarstique du SAS 1 (rouge) et de la source de la Haute Fageotte (en vert). L'hydrogramme de l'émergence épikarstique pour la période d'étude est aussi présenté.

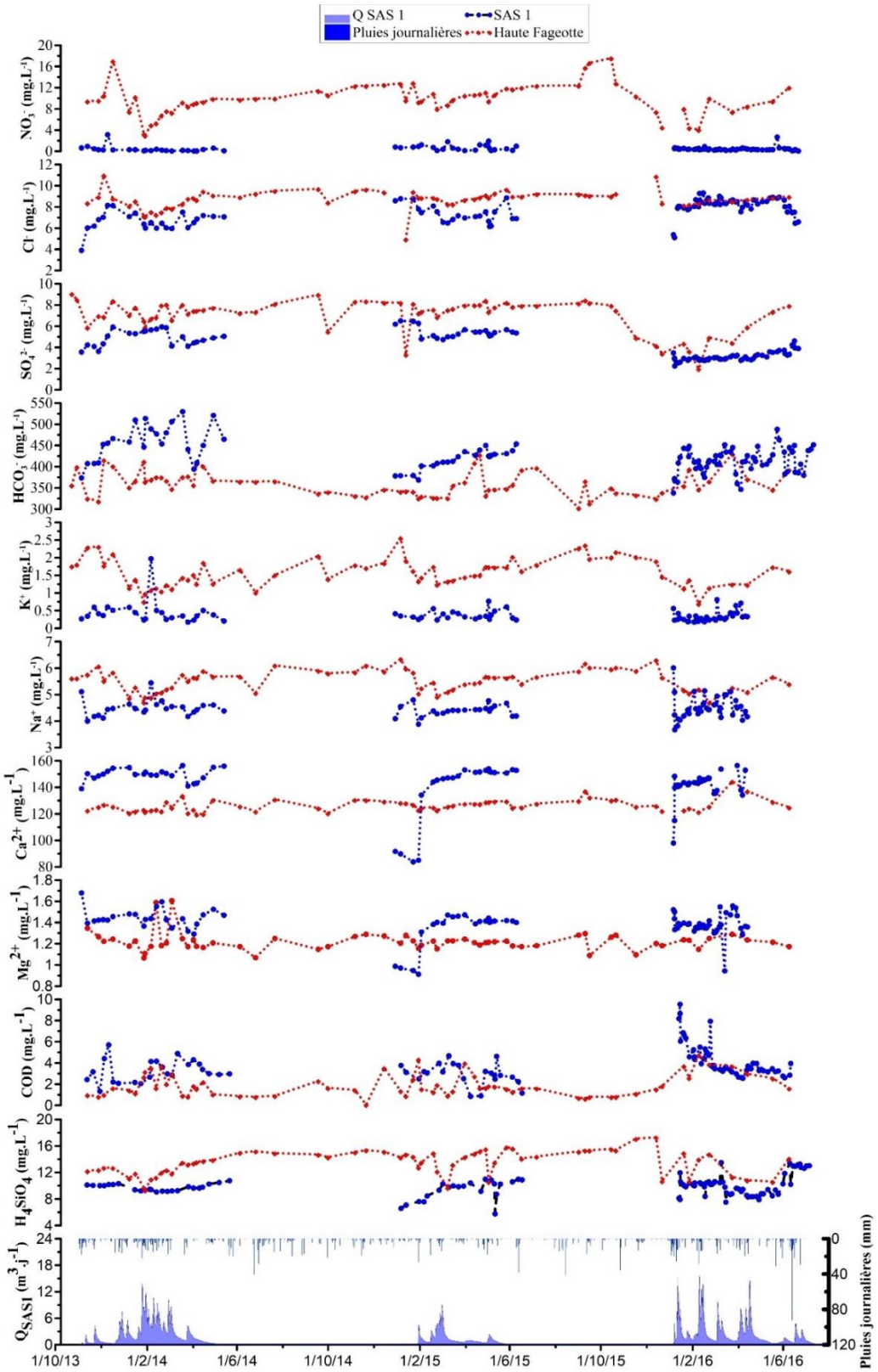


Figure V-13 : Evolution des différents éléments majeurs, silice dissoute et COD retrouvés dans les eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. . L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée.

Tableau V-5 : Principales valeurs statistiques décrivant les concentrations en ions majeurs, l'alcalinité (HCO_3^-) ainsi que la silice dissoute et le DOC mesurées dans les échantillons d'eau du SAS 1 et de la Haute Fageotte entre Octobre 2013 et Juillet 2016. Les prélèvements présentant des balances ioniques supérieures à 6% ne sont pas considérés.

Points de prélèvement	**Statistiques**	**HCO_3^- (mg.L^{-1})**	**Ca^{2+} (mg.L^{-1})**	**Mg^{2+} (mg.L^{-1})**	**Na^+ (mg.L^{-1})**	**K^+ (mg.L^{-1})**	**SO_4^{2-} (mg.L^{-1})**	**Cl^- (mg.L^{-1})**	**NO_3^- (mg.L^{-1})**	**F^- (mg.L^{-1})**	**SiO_2 (mg.L^{-1})**	**COD (mg.L^{-1})**
SAS 1	*Moyenne*	422.63	143.02	1.39	4.47	0.55	4.02	7.74	0.48	0.05	9.90	3.73
	Maximum	529.48	167.34	1.68	6.01	7.71	6.51	14.16	3.13	0.14	13.47	9.53
	Minimum	337.94	83.83	0.91	3.67	0.17	2.25	3.90	0.03	0.02	5.74	0.84
	Ecart type	36.36	15.89	0.13	0.35	1.10	1.16	1.32	0.47	0.03	1.45	1.51
	Cv (%)	9%	11%	9%	8%	202%	29%	17%	98%	48%	15%	40%
Haute Fageotte	*Moyenne*	359.25	126.36	1.22	5.53	1.58	7.05	8.88	9.91	0.04	13.54	1.84
	Maximum	430.66	144.49	1.61	6.35	2.56	9.07	13.55	17.61	0.08	17.30	4.76
	Minimum	302.56	118.04	1.07	4.59	0.70	1.98	4.97	2.99	0.02	9.32	0.07
	Ecart type	29.10	4.57	0.09	0.41	0.40	1.53	1.18	2.98	0.01	1.83	1.06
	Cv (%)	8%	4%	7%	7%	25%	22%	13%	30%	26%	14%	58%

L'analyse globale des concentrations en ions majeurs, COD et silice dissoute montre des différences certaines selon le type d'écoulement :

- SAS 1 : Eau globalement fortement chargée en Ca^{2+} et HCO_3^- typique d'écoulements épikarstiques avec de faibles concentrations pour les autres éléments mis à part pour le COD qui peut atteindre plus de 5 $mg.L^{-1}$ au cours des crues d'hiver,
- Haute Fageotte : Eau bicarbonatée calcique avec des concentrations en NO_3^-, Cl-, SO_4^{2-}, SiO_2, K^+ et Na^+ généralement plus importantes qu'au SAS 1 avec une variabilité moins importante au cours de l'année comme en témoignent les coefficient de variation inférieurs pour cette émergence. Cette relative constance des paramètres hydrogéochimique de cet écoulement suggère la présence d'une réserve tampon (nappe perchée) alimentant cet écoulement pérenne tout au long de l'année. Les plus fortes teneurs en nitrates sont à mettre en relation avec une pollution diffuse d'origine agricole ou provenant des rejets anthropiques au niveau du facsimilé de la cavité de Lascaux (parking, fosse sceptiques, *etc.*).

Néanmoins selon les périodes de l'année, il peut être observé un rapprochement des signaux chimiques (COD, SiO_2d, HCO_3^-, Mg^{2+}, Na^+ ou encore SO_4^{2-}) de ces deux émergences notamment durant les périodes de fortes pluies et de crues au SAS 1. Nous reviendrons sur ces observations dans la section suivante pour expliquer les conditions d'écoulement dans la zone de transmission de la colline de Lascaux. Parallèlement les isotopes de la molécule d'eau ainsi que le δ^{13}C-CMTD ont été analysés pour les différents prélèvements effectués. Les statistiques descriptives sont présentées dans le Tableau V-6.

Tableau V-6 : Principales valeurs statistiques décrivant les signaux des isotopes de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et δ^2H), mais aussi du δ^{13}C-CMTD mesurés dans les échantillons d'eau du SAS 1 et de la Haute Fageotte entre Octobre 2013 et Juillet 2016.

Statistiques	**SAS 1 (Epikarst)**				**Haute Fageotte (Zone de transmission)**			
	$\delta^{18}O$ (‰)	**δ^2H (‰)**	**Excès ^2H**	**δ^{13}C-TDIC (‰)**	**$\delta^{18}O$ (‰)**	**δ^2H (‰)**	**Excès ^2H**	**δ^{13}C-TDIC (‰)**
Moyenne	-6.70	-42.48	11.35	-13.68	-6.75	-40.76	13.23	-13.08
Maximum	-5.13	-31.72	26.41	-11.94	-5.28	-35.84	22.22	-10.46
Minimum	-8.29	-53.89	1.73	-14.57	-8.07	-44.75	5.56	-14.05
Ecart type	0.56	3.30	4.83	0.59	0.54	2.23	3.87	0.60
Cv (%)	8%	8%	43%	4%	8%	5%	29%	5%

Les isotopes de la molécule d'eau montrent comme attendu une origine de l'eau similaire pour ces deux émergences avec des valeurs similaires. Le positionnement des

différents prélèvements dans le repère $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$ illustre cette observation (Figure V-14). Les valeurs statistiques du $\delta^{13}C$-CMTD soulignent l'impact des ions HCO_3^- sur le signal isotopique de ces deux eaux qui paraissent néanmoins légèrement différentes avec un appauvrissement plus marqué en ^{13}C pour les eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1.

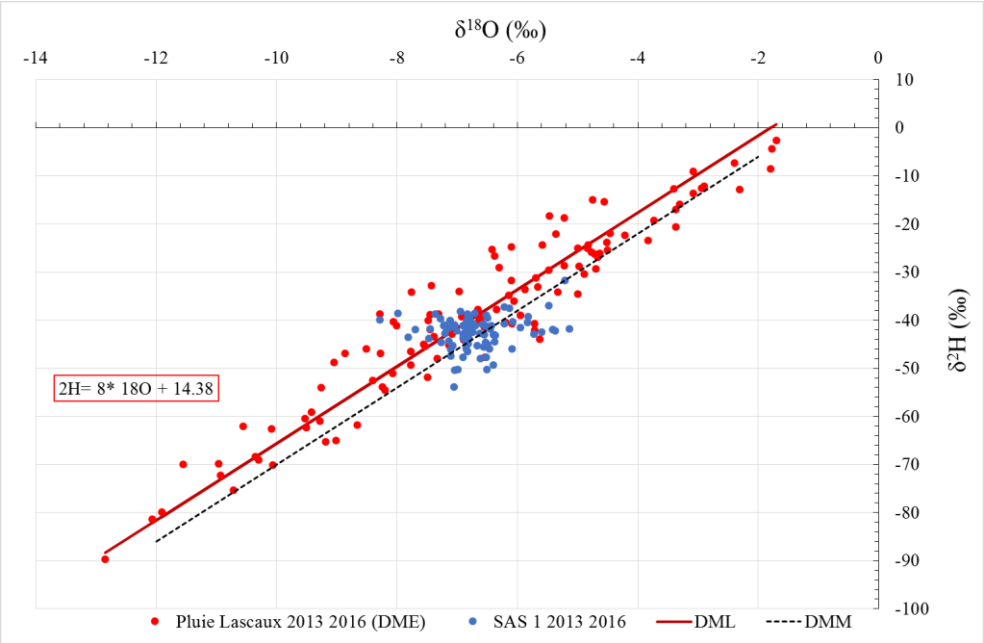


Figure V-14 : Comparaison des mesures isotopiques des pluies, et des eaux des émergences du SAS 1 et de la droite météorique locale (DML) et de la droite météorique mondiale (DMM) dans le repère $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$.

V.3.1.4 Les séries temporelles des paramètres hydrogéochimiques intrinsèques des eaux du SAS 1

Avant de pouvoir analyser les séries temporelles de COD enregistrées en continu au SAS 1, un traitement spécifique des données brutes de fluorescence est nécessaire. Ce traitement des données de fluorescence en continu consiste à trouver une relation linéaire entre la fluorescence mesurée en continu et le COD mesuré en laboratoire. Il apparaît qu'au cours de l'année, la relation entre le signal de fluorescence et le COD varie. Nous discriminons trois périodes différentes correspondant au début du cycle d'écoulement, au milieu du cycle (hiver) et à la fin du cycle d'écoulement (printemps). Ces résultats sont cohérents avec ceux de Tissier et al., (2013) qui montrent une variabilité saisonnière de la nature de la matière organique dissoute et donc de la fluorescence, néanmoins une autre hypothèse peut être émise. En effet, au cours de son temps de séjour dans l'épikarst, le COD est dégradé en CO_2 par l'activité microbienne. Le taux de dégradation de ce COD, dépendant du temps de séjour (Batiot, 2002) pourrait donc provoquer la variabilité de la relation entre COD mesuré en laboratoire et fluorescence intrinsèque de l'eau. Les conditions d'écoulement et le temps de transfert dans le

système qu'elles conditionnent pourrait donc expliquer cette variabilité. La Figure V-15 illustre cette variabilité de la relation entre fluorescence à 370 nm et COD analysé en laboratoire. Les analyses du cycle hydrogéologique 2015-2016 sont prises comme illustration.

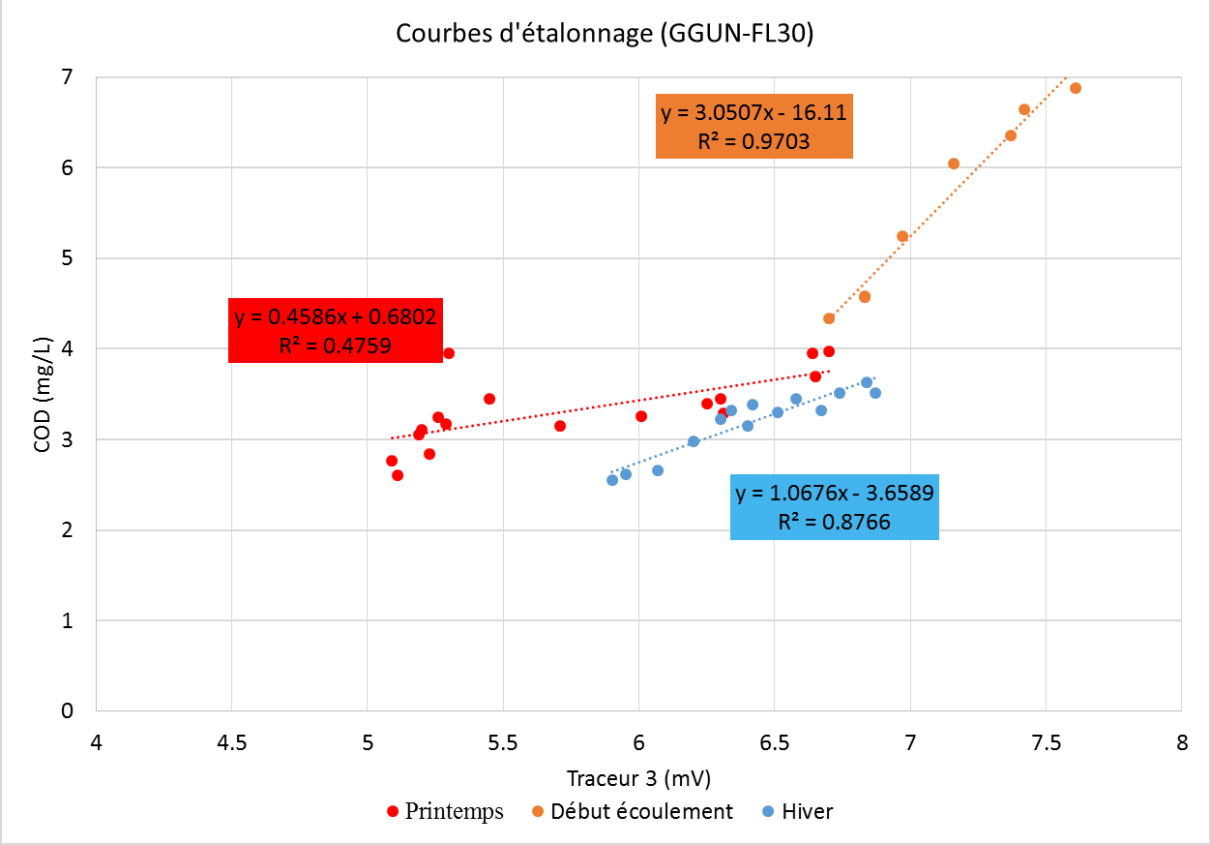


Figure V-15 : Courbes d'étalonnage déterminées par comparaison des analyses en COD en laboratoire et fluorescence mesurée in-situ à 370 nm à l'émergence épikarstique du SAS 1. Les relations numériques entre ces deux paramètres sont aussi présentées.

Les séries temporelles des différents paramètres physico-chimiques ainsi que du COD enregistrées au cours des trois années d'étude grâce au dispositif de suivi en continu des écoulements de l'émergence épikarstique du SAS 1 sont présentées en Figure V-16. Les principales statistiques décrivant ces différentes séries temporelles sont présentées dans le Tableau V-7 pour chaque cycle hydrogéologique puis pour toute la période d'étude.

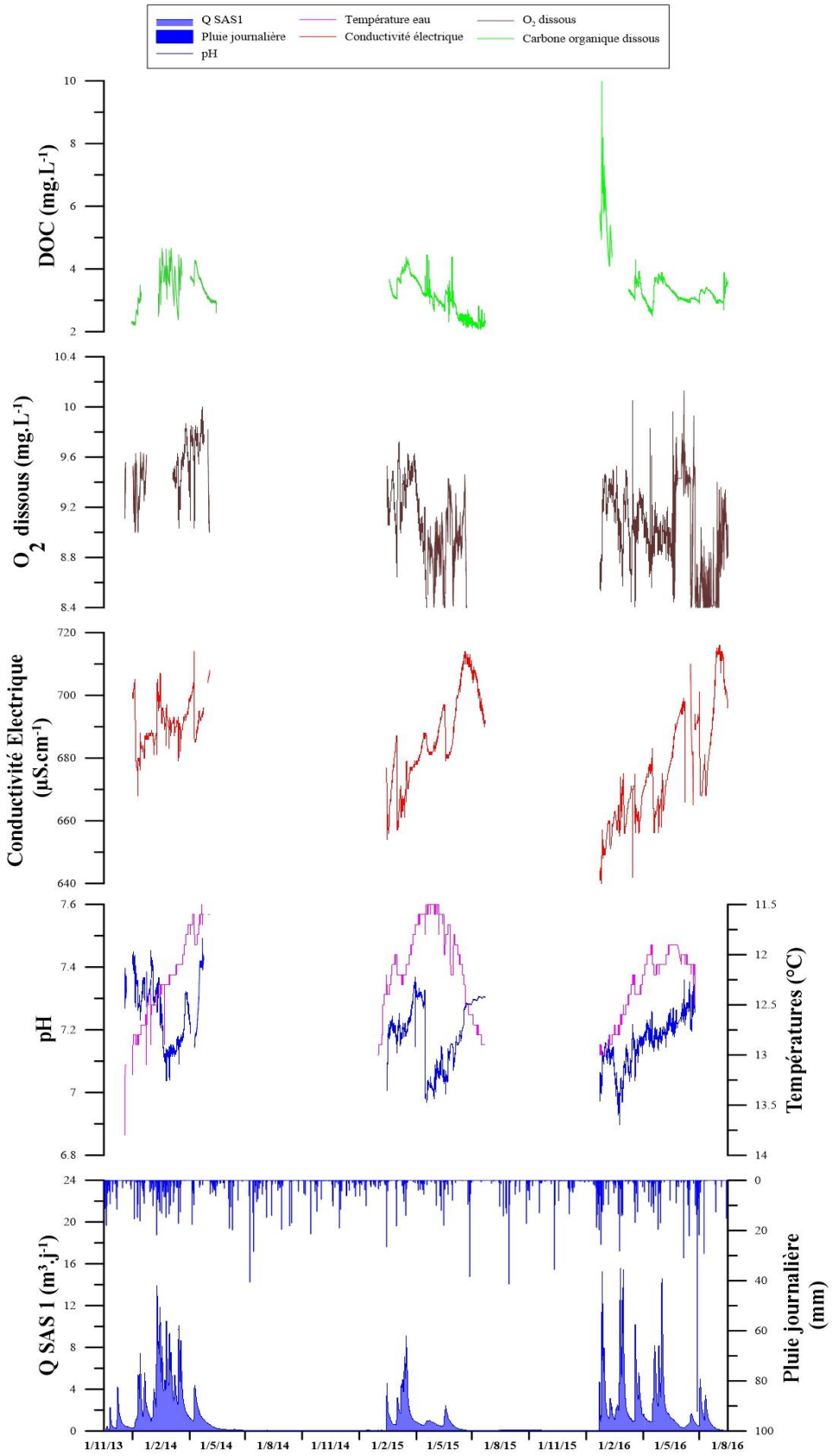


Figure V-16 : Evolution des paramètres physico-chimiques et du COD enregistrés en continu à l'émergence épikarstique du SAS 1 de Décembre 2013 à Juillet 2016. Les trous dans les séries données correspondent soit aux périodes de tarissement de l'écoulement ou encore à des problèmes d'alimentation des centrales d'acquisition.

Tableau V-7 : statistiques des séries temporelles des paramètres physico-chimiques et du COD enregistrés à l'émergence épikarstique du SAS 1. Les différents cycles hydrogéologiques sont dans un premier temps considérés indépendamment puis de façon globale ;

Statistiques	**2013-2014**					**2014-2015**					**2015-2016**					**2013-2016**				
	COD (mg.L)	Conductivité (µS/cm)	pH	O_2 dissous (mg/L)	Temp (°C)	COD (mg.L)	Conductivité (µS/cm)	pH	Temp (°C)	O_2 dissous (mg/L)	COD (mg.L)	Conductivité (µS/cm)	pH	O_2 dissous (mg/L)	Temp (°C)	COD (mg.L)	Conductivité (µS/cm)	pH	O_2 dissous (mg/L)	Temp (°C)
Moyenne	3.01	691.55	7.24	9.56	12.15	3.06	686.56	7.28	12.24	8.97	3.41	672.88	7.19	8.99	12.4	3.23	684.33	7.24	9.45	11.32
Minimum	2.18	679	6.88	8.92	11.5	2.12	654	6.97	11.5	7.14	2.48	639	6.9	7.99	11.9	2.12	639	6.88	7.99	7.14
Maximum	4.67	714	7.49	10	13.1	4.46	714	7.36	13.2	10.21	9.98	716	7.34	10.13	13	9.98	716	7.49	10.21	13.8
Ecart type	0.58	5.60	0.1	0.19	0.33	0.62	14.42	0.21	0.54	0.52	1.55	16.58	0.12	0.34	0.34	0.63	14.69	1.04	1.54	1.59
Cv	19%	1%	1%	2%	3%	20%	2%	3%	4%	6%	61%%	2%	2%	4%	3%	19%	2%	14%	15%	14%

Une première analyse graphique montre une variabilité haute fréquence importante des signaux enregistrés mis à part pour la température de l'eau qui semble suivre une évolution sinusoïdale rappelant celle du massif karstique modélisée au chapitre 3 ou encore celle des températures enregistrées aux parois de la cavité (chapitre 4). Néanmoins, les eaux arrivant à l'émergence suite aux crues hivernales impactent ce paramètres soulignant le temps de transfert assez rapide des eaux dans le système lors de ces évènements, ne permettant pas une mise à l'équilibre thermique avec l'encaissant. L'évolution des autres paramètres sera analysée plus finement dans la section suivante avec pour objectif d'augmenter la finesse d'interprétation des conditions d'écoulement dans le système épikarstique étudié.

L'interprétation des valeurs statistiques de chaque cycle hydrogéologique et leur comparaison apportent des pistes de réflexion :

- Le COD présente des valeurs évoluant de 2.12 à 10 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne de 3.23 $mg.L^{-1}$ sur l'ensemble des données recueillies. Cette gamme de variation importante (19% de coefficient de variation) suggère d'ores et déjà la participation potentiellement importante d'eau à faible temps de séjour notamment pour les valeurs élevées se rapprochant des valeurs enregistrées dans les eaux du sol (20 $mg.L^{-1}$ en moyenne). A contrario, les concentrations moins élevées montrent la participation à l'écoulement d'eau à temps de séjour bien plus long dans le système. La comparaison des différents cycles d'écoulement souligne la variabilité interannuelle des concentrations en COD qui suggère des conditions d'écoulement différentes selon les années avec notamment une variabilité beaucoup plus importante pour le cycle excédentaire 2015-2016.
- La conductivité électrique montre quant à elle une variabilité interannuelle moindre avec des valeurs évoluant de 639 à 716 µS/cm pour une moyenne de 684 µS/cm. Les valeurs minimales et maximales étant rencontrées au cours du cycle 2015-2016. Cependant, il apparait que la conductivité moyenne décroit au cours des trois années d'étude avec une valeur moyenne maximale pour le cycle 2013-2014. La conductivité étant essentiellement expliquée par la minéralisation bicarbonatée calcique, il est probable que cette évolution soit conditionnée par la variation des conditions d'équilibre calco-carbonique des eaux au cours de nos trois années d'étude. Des hypothèses expliquant ce comportement particulier seront énoncées ultérieurement au cours de la partie traitant des équilibres calco-carboniques des eaux arrivant dans la cavité de Lascaux.
- Le taux d'oxygène dissous présent dans l'eau, marqueur des conditions d'échange entre air et eau dans l'épikarst montre aussi des variations significatives avec des valeurs

comprises entre 7.99 et 10 $mg.L^{-1}$ pour une moyenne au cours des trois années de 9.45 $mg.L^{-1}$. La variabilité la plus importante de ce paramètre est retrouvée au cours des cycles 2014-2015 et 2015-2016. De plus, il est observé une diminution de la valeur moyenne de ce paramètre au cours de ces deux cycles en comparaison avec celle du premier cycle étudié. Cette tendance similaire à celle de la conductivité électrique semble elle aussi dénoter d'un changement des conditions d'équilibre entre air et eau dans le massif ou à l'exutoire dans la cavité.

- Le pH des eaux de l'émergence épikarstique est compris entre 6.88 et 7.49 pour une moyenne de 7.24 au cours des trois cycles étudiés. Aucune tendance claire ne se dégage de l'analyse statistique de ce paramètre. Ceci est dû à la difficulté d'interpréter les variations de ce paramètre physico-chimique de manière indépendante des autres paramètres hydrogéochimiques de l'eau.

Au vue des premières informations mises en lumière par l'analyse générale des séries temporelles des différents paramètres physico-chimiques et de la concentration en COD, il parait intéressant de se pencher plus en détails sur l'évolution de ces paramètres. Cependant, et afin de ne pas rendre plus complexe l'interprétation des nombreux paramètres enregistrés, l'étude des conditions d'écoulement dans l'épikarst se basera essentiellement sur l'analyse de deux paramètres antagonistes que sont la conductivité électrique et la concentration en COD. Ce choix ne doit rien au hasard tant ces traceurs naturels semblent être les plus affectés par les conditions d'écoulement dans l'épikarst.

V.3.2 Analyse des conditions d'écoulement dans l'épikarst de la Grotte de Lascaux par l'étude des traceurs naturels

Cette section a pour objectif d'analyser l'évolution intra et interannuelle générale des conditions d'écoulement dans l'épikarst et la zone de transmission de la cavité de Lascaux. Pour atteindre cet objectif les séries temporelles des deux paramètres évoqués précédemment et enregistrés en continu à la sortie de l'épikarst seront utilisées avec en parallèle l'évolution des concentrations en silice dissoute mesurées ponctuellement. Les mesures ponctuelles de ces trois paramètres ainsi que celles des nitrates seront analysées dans un second temps pour la source de la Haute Fageotte afin de discriminer les apports d'eau provenant de la zone de transmission et de l'épikarst à cette émergence selon les conditions d'écoulement.

V.3.2.1 Variabilité à l'échelle saisonnière des conditions d'écoulement dans l'épikarst : des conditions d'écoulement variables au cours du cycle d'écoulement

Afin d'illustrer nos propos, les mesures du cycle d'écoulement 2013-2014 sont considérées dans cette partie. Ce cycle est excédentaire en terme de volumes écoulés (482 m^3) au regard des dix derniers cycles d'écoulement (312 m^3 en moyenne). La reprise des écoulements se produit au début du mois de Novembre 2013 suite aux sollicitations pluvieuses importantes. Néanmoins, les premières crues conséquentes suivies de l'établissement d'un débit de base n'arrivent qu'à la fin du mois de Décembre 2013. S'en suit une succession de crues de plus ou moins forte intensité suivies d'une vingtaine de jours au cours desquels la décrue s'installe. Enfin, un dernier épisode de crue est enregistré à la fin du mois de Mars 2014. L'écoulement se tarit finalement au cours du mois de Mai 2014.

La Figure V-17 présente l'évolution des paramètres hydrogéochimiques (COD, silice dissoute et conductivité électrique) en parallèle de l'évolution des débits et des pluies enregistrés sur le site de la Grotte de Lascaux. Les blancs dans les données sont expliqués par des pannes du dispositif de mesure en continu.

Au cours de ces écoulements, trois périodes sont discriminées en analysant l'évolution des traceurs naturels présentés :

- Le début du cycle d'écoulement (Novembre 2013 au 20 Décembre 2013), une période de faible saturation en eau de l'épikarst : les teneurs en Silice dissoute et la conductivité électrique sont élevées. A contrario, le COD présente les valeurs les plus faibles de ce cycle (2.3 $mg.L^{-1}$). Ces observations montrent clairement que l'écoulement est soutenu par des eaux à long temps de séjour dans le compartiment capacitif épikarstique. Ainsi, un stockage d'eau dû à la recharge automnale s'est constitué avant la reprise des écoulements. Cette réserve est alors drainée vers l'exutoire par effet piston.
- La succession de crues importantes (Décembre 2013 au 20 Janvier 2014), période d'augmentation de la saturation en eau de l'épikarst : les teneurs en silice dissoute ainsi que la conductivité électrique décroissent brutalement dès l'occurrence de la première crue importante de la fin du mois de Décembre. A contrario, le COD voit sa concentration augmenter simultanément. Les infiltrations d'eau plus récentes viennent donc affecter le marquage chimique des écoulements par mélange avec la réserve d'eau à plus long temps de séjour de l'épikarst. Par la suite une réserve en eau plus importante semble se constituer

dans l'épikarst. Les écoulements sont transmis à l'exutoire par transfert de pression à chaque infiltration d'eau significative. Chaque crue est alors accompagnée de phénomènes de dilution restreints soulignant la participation moins importante des infiltrations rapides à travers les zones transmissives de l'épikarst (fractures, fissures). Certains d'entre elles paraissent mobiliser des eaux à plus long temps de séjour présentant une conductivité électrique plus importante. En effet, au cours de la crue du 25 Janvier 2014, la conductivité électrique augmente fortement, soulignant la mobilisation d'eaux plus minéralisées.

- La fin du cycle d'écoulement (20 Mars 2014 à la fin Mai 2014), période de diminution de la teneur en eau de l'épikarst : la conductivité électrique montre une tendance à une augmentation continuelle. Le drainage de la réserve en eau du compartiment épikarstique devient alors prépondérant avec toutefois une dernière crue de printemps au cours de laquelle la conductivité diminue fortement tout comme la silice dissoute, avec comme corollaire une augmentation du COD. Un phénomène de dilution important par des eaux à faible temps de résidence dans le système se met alors en place. L'influence de ce mécanisme est alors semblable à celle observée lors de la première crue significative de ce cycle d'écoulement.

Ainsi, une première analyse globale de ces signaux hydrogéochimiques démontre le rôle important de la réserve épikarstique et de son importance sur les types d'eau (zone transmissive/zone capacitive/long temps de résidence/faible temps de résidence) et leur participation respective dans l'écoulement. En effet, en contexte de faible teneur en eau de l'épikarst (début et fin de cycle), les eaux présentes dans les zones capacitives du système sont drainées vers l'exutoire. Néanmoins, lors de sollicitations pluvieuses, la participation des eaux d'infiltration rapide par les zones transmissives de l'épikarst est importante (phénomène de dilution conséquent). A contrario, lorsque la réserve et donc la teneur en eau de l'épikarst est plus importante, les écoulements des eaux à faible temps de séjour par les zones transmissives participent de façon moins importante à l'écoulement à l'exutoire. Leur impact sur la chimie des eaux à l'exutoire est alors moindre.

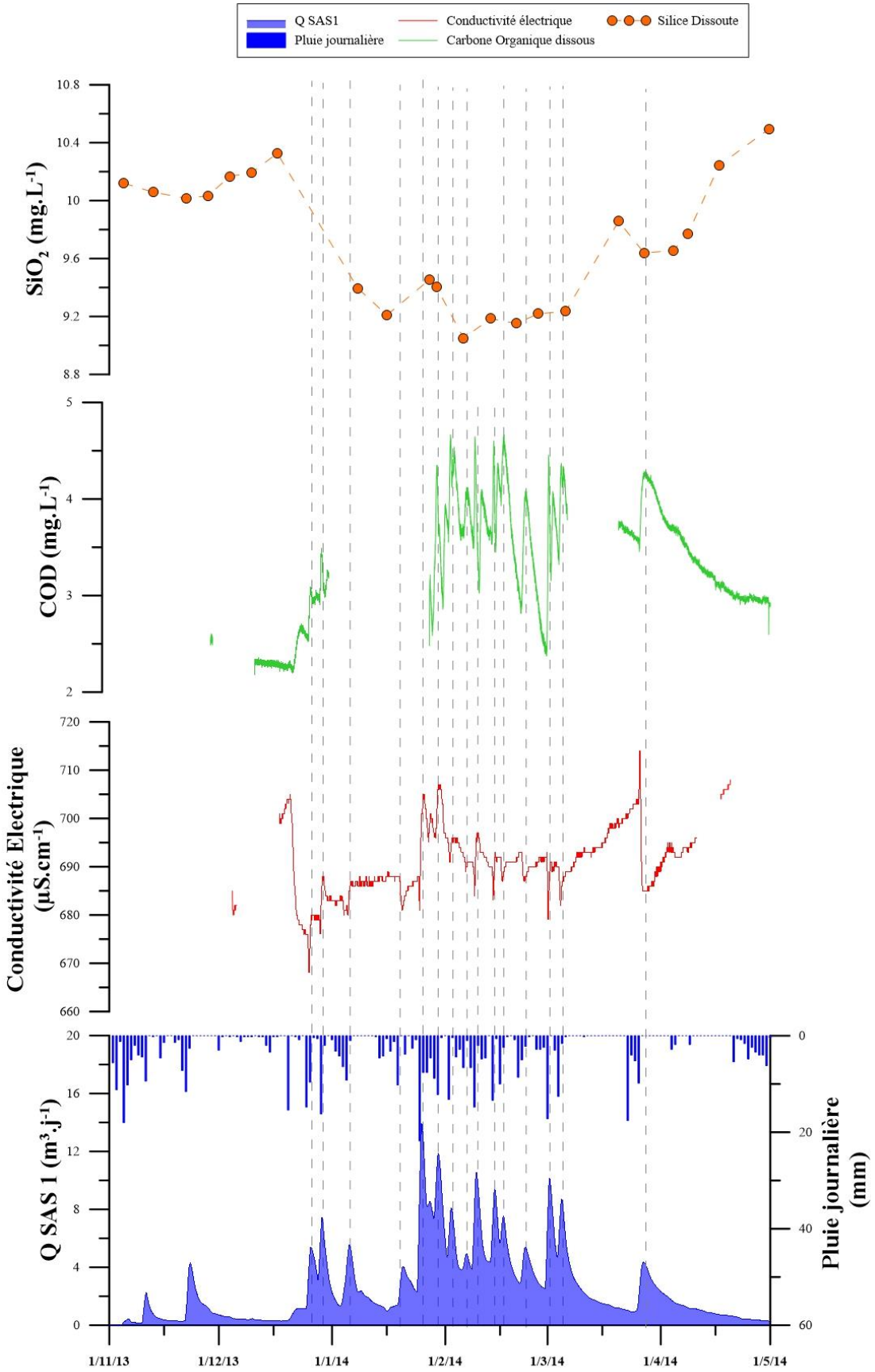


Figure V-17 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2013-2014. Les pointillés marquent les pics de crue.

V.3.2.2 Variabilité des conditions d'écoulement à l'échelle de l'épisode :

Afin d'augmenter la finesse d'interprétation, il est nécessaire d'abaisser l'échelle d'observation en s'intéressant à la variabilité des conditions d'écoulement à l'échelle des épisodes de crue. Pour cela, deux périodes du cycle d'écoulement permettant l'analyse des réponses hydrogéochimiques des écoulements seront considérées :

- Teneur en eau importante dans l'épikarst : Février 2014 (Figure V-18),
- Phase de drainage prépondérant de la réserve épikarstique en fin du cycle d'écoulement : 15 Mars au 01 Mai 2014 (Figure V-19).

Ces périodes ont été choisies car elles sont représentatives des mécanismes observés au cours des trois cycles hydrogéologiques étudiés.

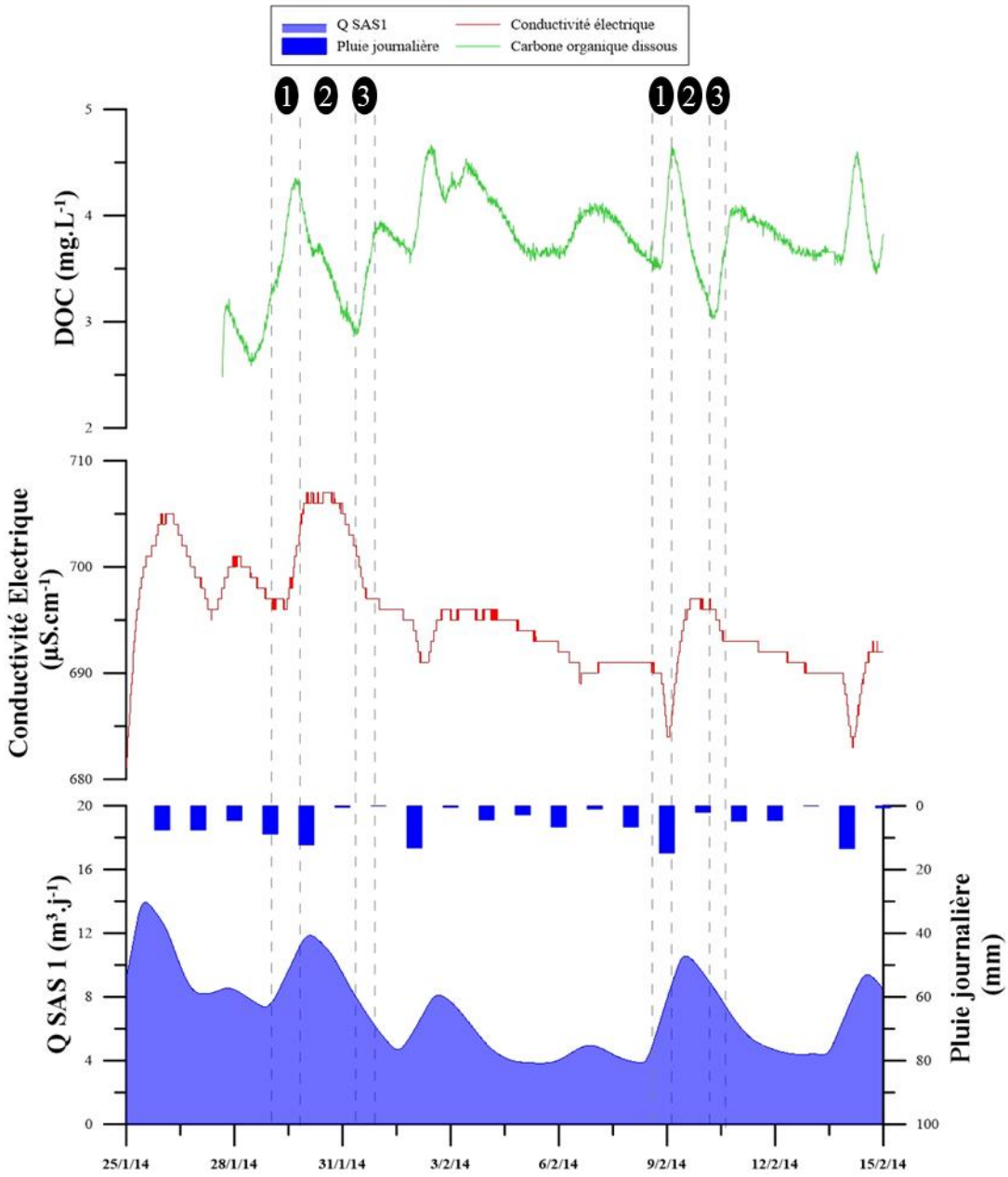


Figure V-18 : Evolution des concentrations en COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 du 25/01/2014 au 15/02/2014. Les pointillés marquent les changements significatifs des paramètres mesurés au cours d'une même crue. Les annotations 1, 2 et 3 montrent la participation des différents types d'eau.

En étudiant plus en détails les chroniques du mois de Février (épikarst saturé), un comportement singulier est mis en évidence pour les crues dont l'intensité est supérieure à 8 $m^3 \cdot j^{-1}$ où il se produit deux phénomènes successifs :

- 1) Une dilution par des eaux à temps de séjour moins important (minéralisation plus faible et COD plus important) transitant par les zones transmissives et participant à l'écoulement,
- 2) La mobilisation d'eaux à temps de séjour plus important dans le système (minéralisation plus importante et COD plus faible). Ainsi, lorsque le système est fortement saturé en eau, des réserves d'eau qui ne participaient pas à l'écoulement, sont alors sollicitées suite à la mise en place de connections hydrauliques nouvelles. Leur drainage vers l'exutoire se met alors en place
- 3) Augmentation progressive de la participation des eaux à plus faible temps de séjour par drainage progressif de ces eaux situées dans les zones transmissives.

La mise en lumière de la création de connections hydrauliques mettant en communication certaines zones auparavant isolées de la zone d'alimentation de l'épikarst, témoigne de l'évolutivité de la surface de la zone d'alimentation. Ce constat amène à se poser des questions sur la formalisation des périmètres de protection dans les systèmes karstiques. Il pourrait aussi expliquer en partie les difficultés rencontrées par Lopez (2009) pour restituer les débits de l'émergence épikarstique du SAS 1 au travers de la modélisation réservoir. A contrario, il confirme l'importance de prendre en compte la teneur en eau du système dans cette démarche de modélisation comme l'avait montré Minvielle (2015).

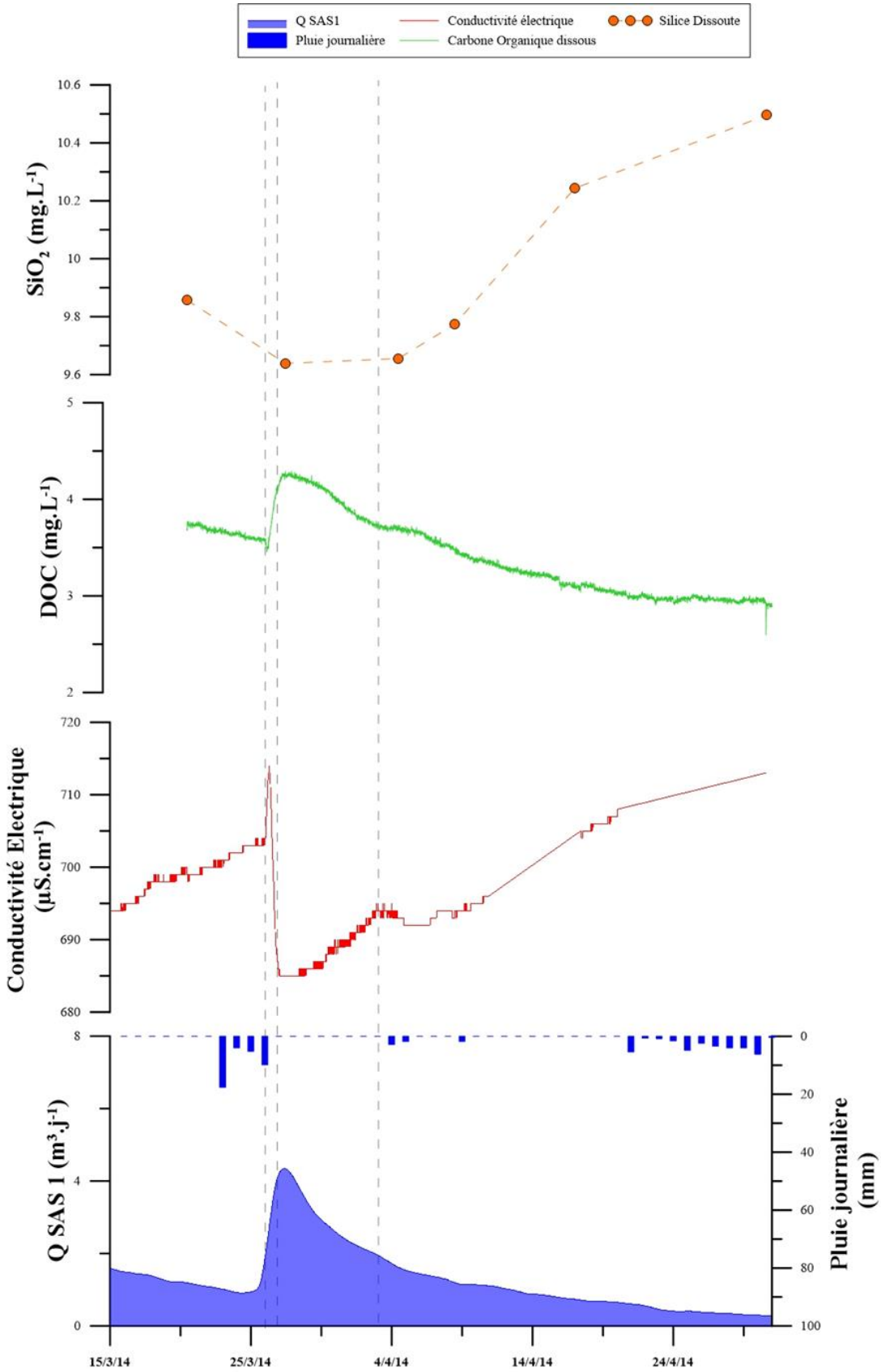


Figure V-19 : Evolution des concentrations en silice dissoute et en COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 du 15/03/2014 au 01/05/2014. Les pointillés marquent les changements significatifs des paramètres mesurés au cours d'une même crue.

La fin du cycle voit des eaux à long temps de séjour (zone capacitive) participer en majorité à l'écoulement par drainage. La crue particulière du printemps Figure V-19 voit une participation de plusieurs types d'eau selon des modalités d'écoulement différentes :

- 1) Effet piston d'eau à long temps de séjour (minéralisation importante et faible COD) encore présentes dans les zones transmissives par les nouvelles eaux s'infiltrant dans le système.
- 2) Participation des eaux nouvellement infiltrées à l'exutoire (augmentation de la concentration en COD et diminution importante de la conductivité). En cette période de faible teneur en eau de l'épikarst, la proportion de ces eaux à faible temps de résidence à l'écoulement est supérieure à celle observée lors des crues de la période de forte teneur en eau de l'épikarst. Cette participation diminue ensuite progressivement.
- 3) Arrivée d'un écoulement retardée provoquant une légère baisse de la conductivité et une faible augmentation de la concentration en COD. Bien que la participation de cet écoulement retardée à l'écoulement soit faible, elle dénote de la complexité des conditions d'écoulement dans un système aussi hétérogène que l'épikarst.

L'analyse détaillée de cet épisode de crue apporte encore des arguments en faveur de la prise en compte de la teneur en eau de l'épikarst pour reproduire le comportement hydrodynamique de l'épikarst notamment du point de vue des composantes rapides et retardées de l'infiltration.

V.3.2.3 Variabilité interannuelle des conditions d'écoulement dans l'épikarst :

Afin de discriminer la variabilité des conditions d'écoulements entre les différents cycles hydrogéologiques, les mêmes paramètres hydrogéochimiques sont analysés pour les deux autres cycles étudiés : 2014-2015 (Figure V-20) et 2015-2016 (Figure V-21).

Deux différences importantes sont mises en exergue à travers l'analyse comparative de chacun de ces cycles d'écoulement par rapport au cycle de 2013-2014 :

- Pour le cycle déficitaire de 2014-2015 (153 m^3 écoulés) : la principale différence repose sur la teneur en eau du massif et donc sur l'importance de la réserve épikarstique. En effet, les conditions d'écoulement au cours de ce cycle particulièrement sec en comparaison aux deux autres sont différentes. Même lors des crues les plus importantes du cycle, aucune nouvelle connexion hydraulique

avec des réserves d'eau isolées de la zone d'alimentation principale de l'émergence du SAS 1 n'est observée. Le déficit pluviométrique a donc pour conséquences de limiter le volume de l'épikarst alimentant l'exutoire. Cette observation sous-entend une variabilité interannuelle influencée par les conditions climatiques, de la zone en surface alimentant cet exutoire en fonction des conditions de recharge influencées par les conditions climatiques externes ;

- Pour le cycle excédentaire 2015-2016 (512 m^3 écoulés) : la principale différence relevée l'est au moment de la reprise des écoulements. En effet, contrairement à la reprise des écoulements du cycle 2013-2014 qui mettait en jeu des eaux provenant d'une réserve épikarstique constituée durant les mois de recharge, celle-ci met en jeu une participation importante d'infiltrations rapides. En effet, les signaux chimiques enregistrés montrent des concentrations en COD et des conductivités électriques jamais observées à Lascaux. L'explication de ce comportement particulier repose sur le déficit pluviométrique des mois de recharge (fin d'automne 2015). Ainsi, la réserve en eau présente dans l'épikarst avant la reprise des écoulements est restreinte ce qui permet l'arrivée d'eau très chargée en matière organique dissoute (faible temps de séjour et donc faible dégradation du COD) dans la cavité.

Une autre observation commune à ces deux cycles hydrogéologiques apporte des informations quant à l'évolution du marquage géochimique des eaux de la réserve épikarstique. En effet, en l'absence d'infiltration rapide, les eaux de la réserve épikarstique drainée voit leur conductivité électrique augmenter continuellement tout au long du cycle d'écoulement. Cette augmentation ne peut être expliquée simplement par une augmentation du temps de résidence de l'eau dans le système. Il est alors probable que cette augmentation soit provoquée par l'accroissement de la PCO_2 de l'air de l'épikarst comme montrée au cours du chapitre III, ce qui favorise la dissolution du calcaire.

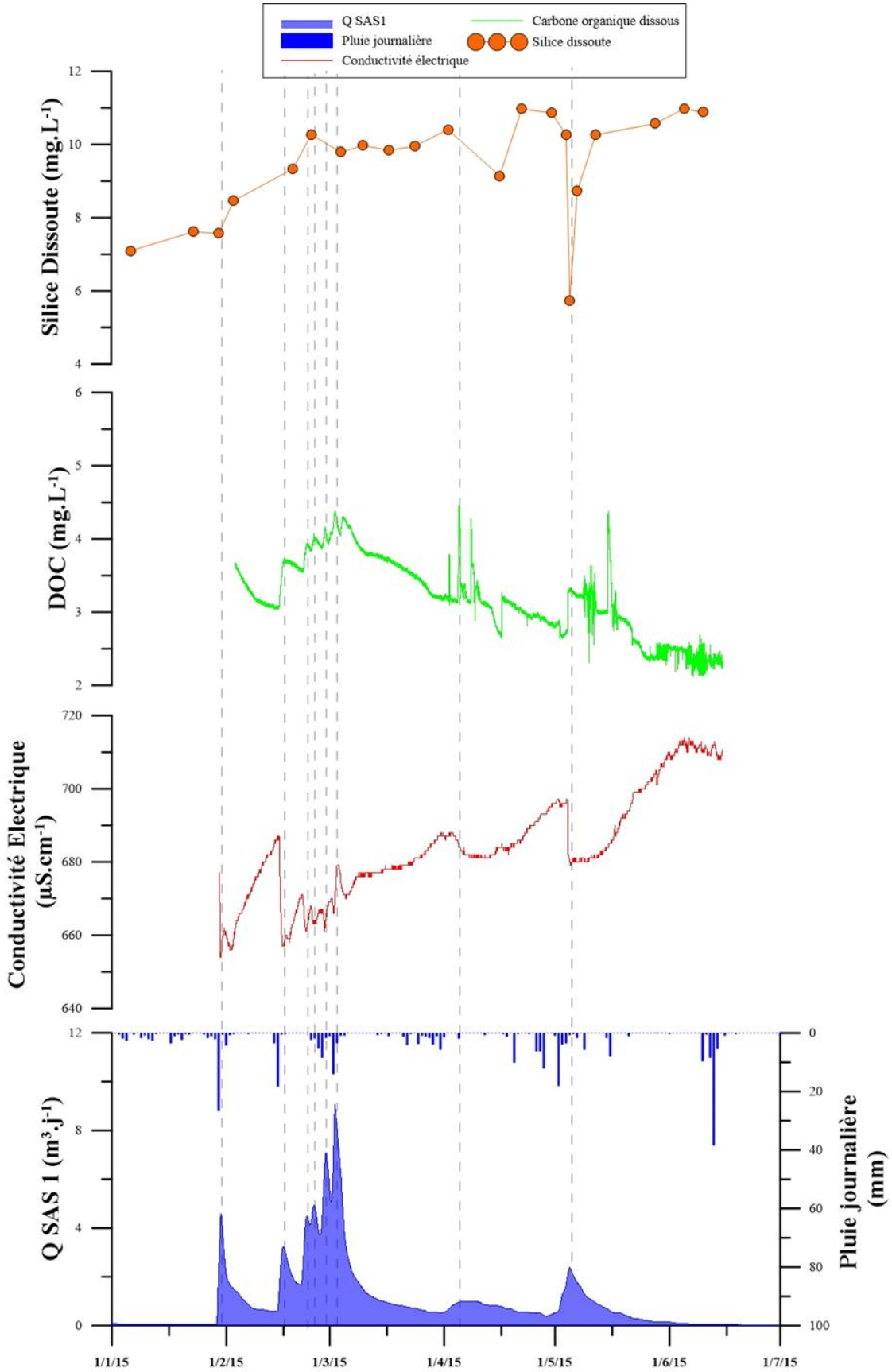


Figure V-20 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2014-2015. Les pointillés marquent les pics de crue.

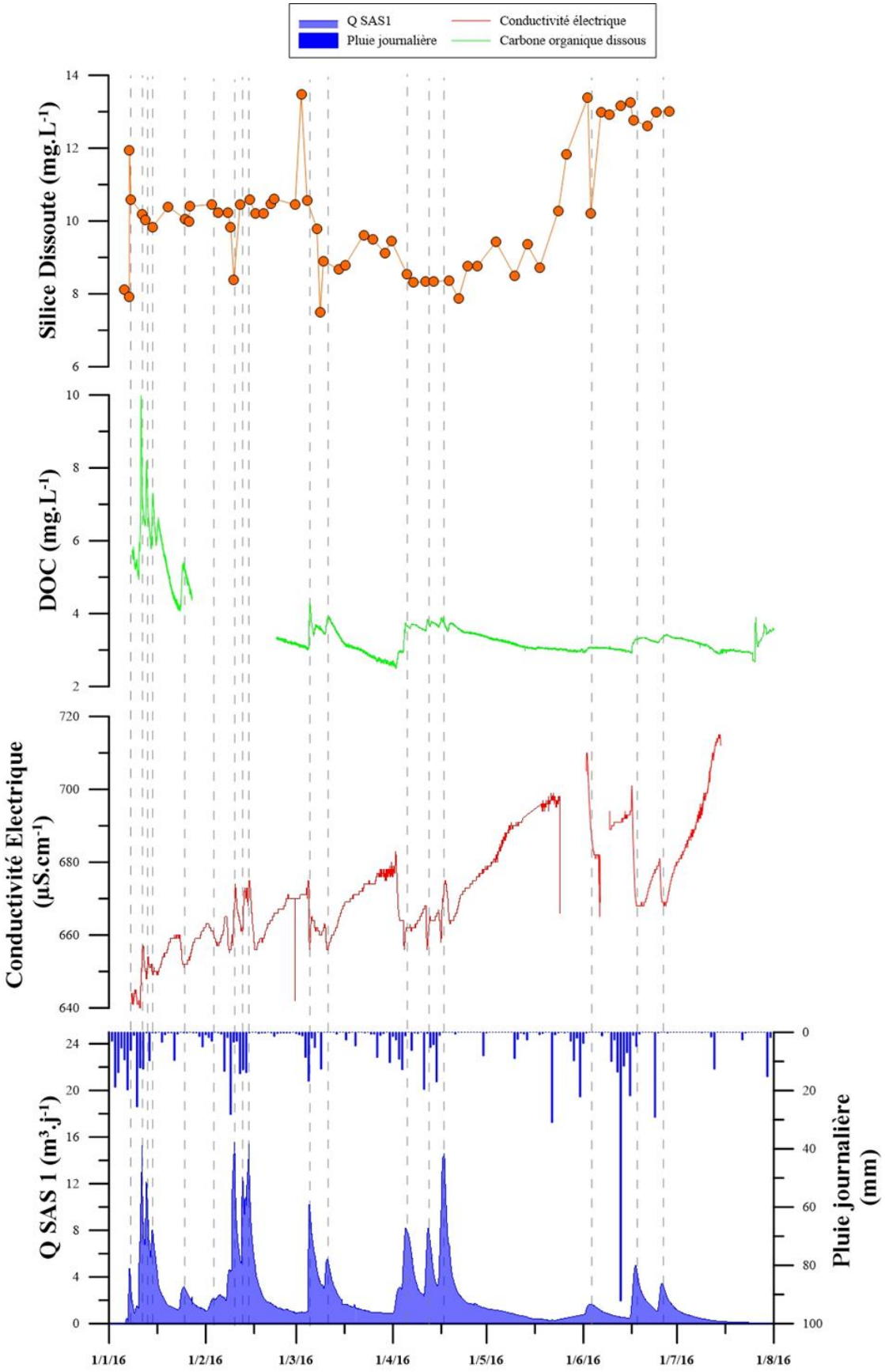


Figure V-21 : Evolution des concentrations en silice dissoute, COD et de la conductivité électrique à l'émergence épikarstique du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2015-2016. Les pointillés marquent les pics de crue.

V.3.3 Les conditions d'écoulement dans la zone de transmission

Afin d'analyser les conditions d'écoulement dans la zone de transmission de la colline de Lascaux, nous nous baserons sur l'évolution temporelle des mêmes éléments chimiques que ceux utilisés dans la section précédente, à la différence que nous ne disposons que d'un suivi ponctuel de ces paramètres pour la Haute Fageotte. Les concentrations en nitrates seront aussi interprétées en tant que marqueur des apports d'eau d'infiltration du compartiment épikarstique rejoignant l'aquifère perché de la Haute Fageotte à travers les zones transmissives. En effet, l'évolution des teneurs en nitrates dans les eaux de cette émergence témoigne d'un apport par infiltration diffuse de cet élément, les concentrations en nitrates étant plus élevées en période de basses eaux.

Pour cela, la Figure V-23 présente l'évolution de ces mêmes paramètres mesurés ponctuellement dans les prélèvements de la source de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. Les débits de cette émergence n'étant pas mesurés, nous rattacherons nos interprétations au débit de l'émergence épikarstique du SAS 1, cette hypothèse introduisant une certaine incertitude dans les observations réalisées. Ces interprétations seront complétées par l'analyse comparative de l'évolution du marquage isotopique de la molécule d'eau aux émergences de l'épikarst et de la zone de transmission (Figure V-22).

L'analyse de l'évolution des concentrations en COD, nitrates et silice dissoute mais aussi de la conductivité électrique permet de distinguer deux périodes principales au cours de l'année :

- En période de basses eaux (été et automne), les différents paramètres considérés sont stables avec des valeurs de COD entre 0.8 et 1 $mg.L^{-1}$, de nitrates entre 10 et 12 $mg.L^{-1}$, de silice dissoute entre 15 et 18 $mg.L^{-1}$ et une conductivité électrique 600 et 610 $\mu S.cm^{-1}$. Au cours de cette période, les écoulements sont soutenus par la réserve de cet aquifère karstique perché qui amortit les signaux analysés.
- En période de hautes eaux (au cours de la période d'écoulement de l'émergence épikarstique du SAS 1), les signaux mesurés sont beaucoup plus variants et permettent de mettre en évidence la participation d'eaux d'infiltration rapide à cet écoulement par les zones transmissives. En effet, de façon concomitante aux crues enregistrées au SAS 1, les concentrations en silice dissoute et nitrates décroissent significativement tout comme la conductivité électrique, quand la

concentration en COD augmente clairement. Les concentrations tendent alors vers celles mesurées dans les écoulements de l'émergence épikarstique.

Une question subsiste toutefois, comment expliquer que la conductivité diminue suite à la participation d'eaux épikarstique qui comportent, à l'émergence épikarstique étudiée, des conductivités supérieures à celles enregistrées à la Haute Fageotte ? Cette diminution de ce paramètre physico-chimique est conditionnée par la précipitation de calcite au cours du trajet de l'eau dans la zone de transmission dont l'air est moins concentré en CO_2. Ainsi, le différentiel de conductivité entre l'eau de l'aquifère perché de la Haute Fageotte et celle des infiltrations rapides est contraint par les autres éléments chimiques (nitrates, silice dissoute, sodium, potassium, chlorure et sulfate) plus concentrés dans les eaux de la Haute Fageotte.

La comparaison de l'influence de ces arrivées d'eau pour les trois années considérées montre clairement l'impact des conditions hydroclimatiques externes sur ces derniers. En effet, les infiltrations d'eau épikarstique sont plus restreintes en proportion et dans le temps pour le cycle déficitaire 2014-2015. Ainsi, ces apports sont conditionnés par la teneur en eau de l'épikarst et donc par l'importance de la réserve épikarstique qui se met en place temporairement sur notre site d'étude.

L'absence de chroniques en continu de ces paramètres chimiques ne nous permet pas de discriminer les conditions d'écoulement dans la zone de transmission avec autant de précision que pour l'épikarst. Néanmoins, l'analyse de l'évolution des paramètres mesurés ponctuellement conduit à la discrimination de périodes durant lesquelles l'écoulement à la source de la Haute Fageotte est soutenu par des apports d'infiltrations provenant du compartiment épikarstique sus-jacent et ce, de façon concomitante aux crues enregistrées en sortie de l'épikarst. L'analyse de la chronique de $\delta^{18}O$ (Figure V-22) vient confirmer ces observations avec une variabilité du signal isotopique au cours des périodes d'apports en eau

épikarstique.

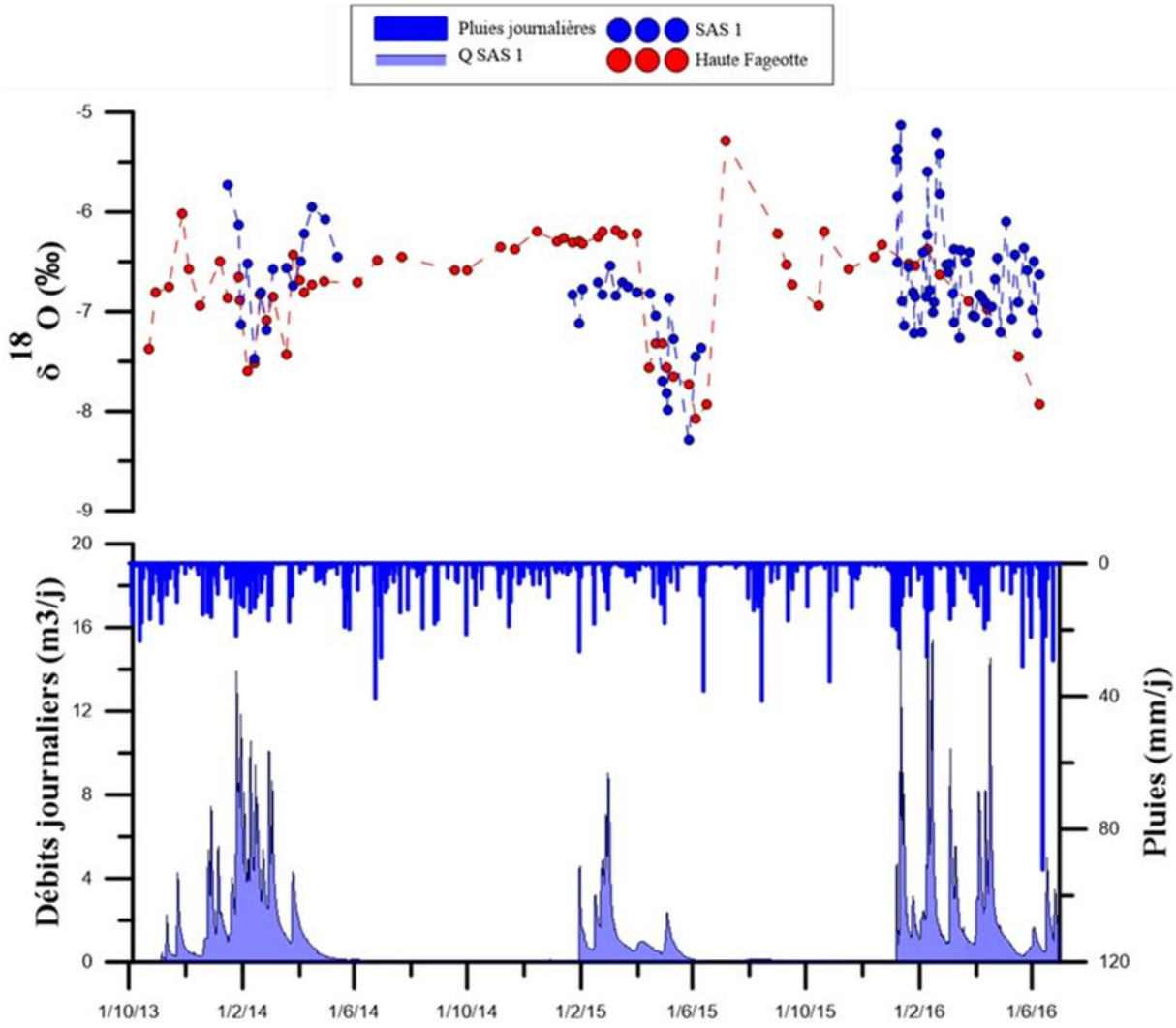


Figure V-22 : Evolution du $\delta^{18}O$ de la molécule d'eau retrouvé dans les eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. L'évolution des pluies et du débit enregistrés à l'émergence épikarstique est aussi présentée.

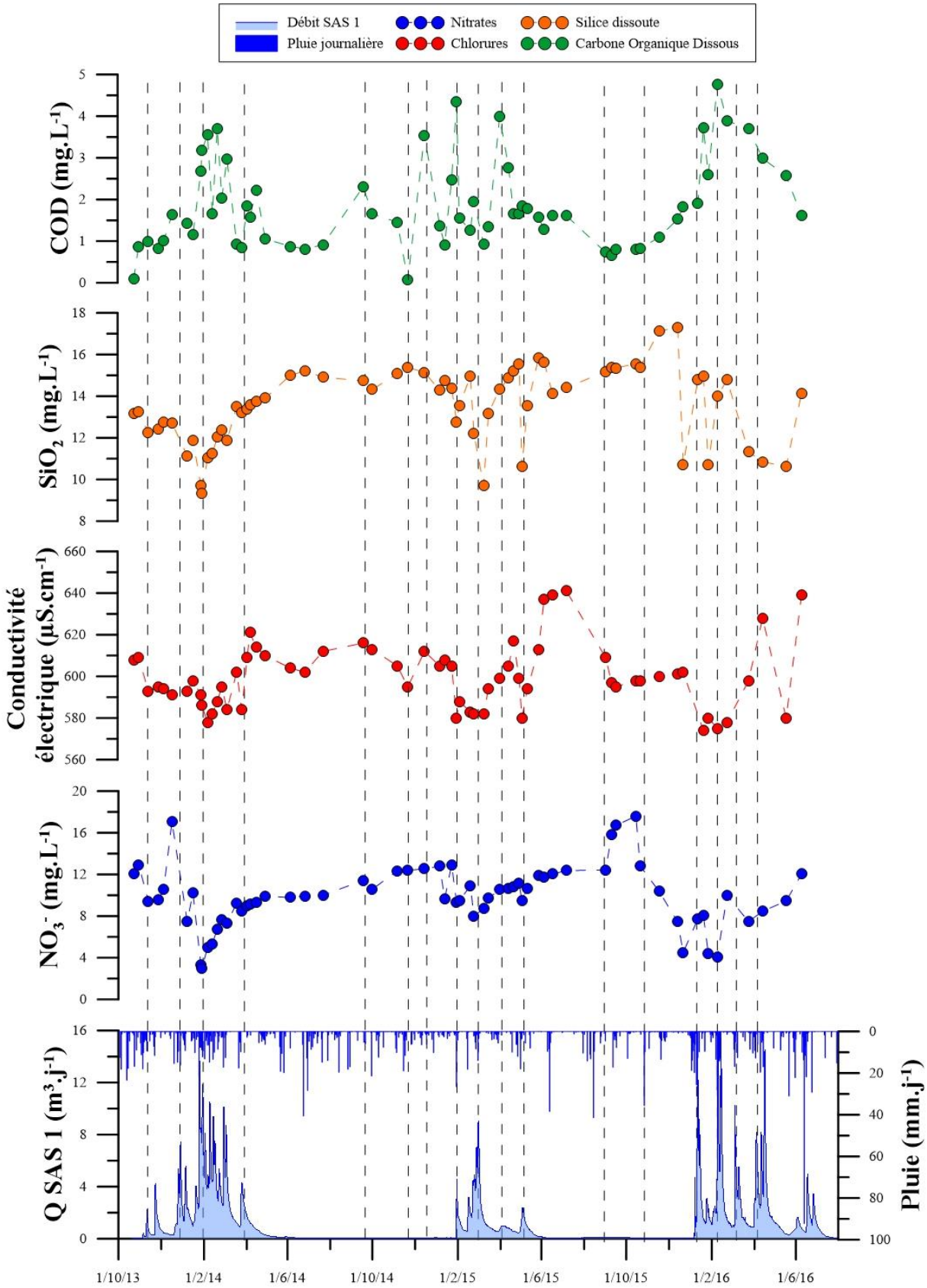


Figure V-23 : Evolution des concentrations en COD, Silice dissoute (SiO_2) et en nitrates (NO_3^-) ainsi que de la conductivité électrique mesurées à la source de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

V.3.4 Influence des conditions d'écoulement dans la zone vadose du karst sur les équilibres calco-carboniques des eaux aux émergences du karst de la colline de Lascaux :

Cette section a pour objectif d'une part de caractériser les équilibres calco-carboniques des eaux des deux compartiments de la zone non saturée, mais aussi d'expliquer les facteurs responsables de la variabilité de l'état d'équilibre de ces eaux. Cette partie a pour objectif de répondre à une attente identifiée du point de vue de l'acquisition et de la variabilité du potentiel de karstification des eaux mais aussi du point de vue de la conservation de la Grotte de Lascaux et de ses parois ornées. En effet, la caractérisation de ces paramètres doit permettre dans la section suivante d'évaluer le comportement des eaux d'infiltration arrivant sur certaines parois de la cavité.

A cette fin, la variabilité spatiale des équilibres calco-carboniques sera présentée pour les émergences de la Haute Fageotte et du SAS 1. Elle sera suivie par la description de l'influence de la teneur en CO_2 de l'épikarst sur la variabilité temporelle de ces équilibres puis de celle des conditions d'écoulement de l'épikarst. Les données d'entrée ainsi que les valeurs des PCO_2éq, PCO_2sat et ISc calculées pour chaque prélèvement des eaux de l'émergence épikarstique et de la Haute Fageotte sont présentées respectivement en **Annexe 11** et **Annexe 12**.

V.3.4.1 Variabilité spatiale des équilibres calco-carboniques des eaux de la zone vadose de Lascaux

Cette première sous-section présente les équilibres calco-carboniques des deux émergences étudiées. Pour cela, les valeurs des paramètres PCO_2éq, PCO_2sat et ISc calculées pour les cycles 2013-2014, 2014-2015 et 2015-2016 sont dans un premier temps analysées statistiquement (Tableau V-8).

Tableau V-8 : Statistiques descriptives des paramètres caractérisant les équilibres calco-carboniques calculés pour les émergences de la Haute Fageotte et du SAS 1 d'octobre 2013 à juillet 2016

	Haute Fageotte			**SAS 1**		
	PCO_2eq	**PCO_2sat**	**ISc**	**PCO_2eq**	**PCO_2sat**	**ISc**
Nombre valeurs	65	65	65	104	104	104
Minimum	1.0%	2.0%	-0.06	0.8%	2.2%	-0.02
Maximum	3.1%	4.5%	0.44	4.2%	6.8%	0.67
Moyenne	1.9%	2.9%	0.19	2.3%	4.3%	0.29
Ecart type	0.004	0.005	0.094	0.006	0.009	0.147
Coefficient de variation	22%	16%	49%	26%	21%	50%

A l'émergence épikarstique, les eaux sont systématiquement sursaturées voir à l'équilibre vis-à-vis de la calcite (ISc > 0) pour une moyenne de 0.29. Elles comportent des PCO_2 à l'équilibre (PCO_2eq) comprises entre 0.8 et 4.20 % pour une moyenne de 2.3 %. Les PCO_2 à saturation vis-à-vis de la calcite (PCO_2sat) varient de 2.2 à 6.8 % pour une moyenne de 4.3 %, surlignant une variabilité importante de ce paramètre comme de la PCO_2éq.

Les eaux de la Haute Fageotte sont aussi systématiquement sursaturées voir à l'équilibre vis-à-vis de la calcite (ISc > 0) pour une moyenne néanmoins inférieure de 0.19 traduisant une proximité plus importante de ces eaux vis-à-vis de l'équilibre avec la calcite. Les PCO_2éq sont quant à elles bien moins variables qu'au SAS 1 et en moyenne moins élevées avec une valeur de 1.9%. Il en est de même pour la PCO_2sat en ce point de sortie de la zone de transmission qui présente des valeurs évoluant de 2.0 % à 4.5 % pour une moyenne de 2.9%. Cette différence témoigne de temps de séjour plus importants pour les eaux de cet aquifère perché, permettant une mise à l'équilibre dans le massif karstique et donc un dégazage accompagné de précipitation de calcite. Cette hypothèse suggère donc que la PCO_2 de l'air de la zone de transmission est moins élevée que celle de l'épikarst.

Afin de mieux apprécier les différences et analogies des équilibres calco-carboniques des eaux de ces deux compartiments de la zone non saturée, il est entrepris de positionner les points de mesure dans le repère ISc = f (-log(PCO_2éq)) qui permet une visualisation simultanée de la variabilité de ces trois paramètres (Figure V-24). Sur ce graphique sont aussi représentées les droites modèles construites selon la démarche de Peyraube et al. (2012). Elles permettent de visualiser les paramètres intrinsèques de chaque émergence (PCO_2sat moyenne). Ces dernières sont présentées pour chaque émergence et pour chaque cycle hydrogéologique.

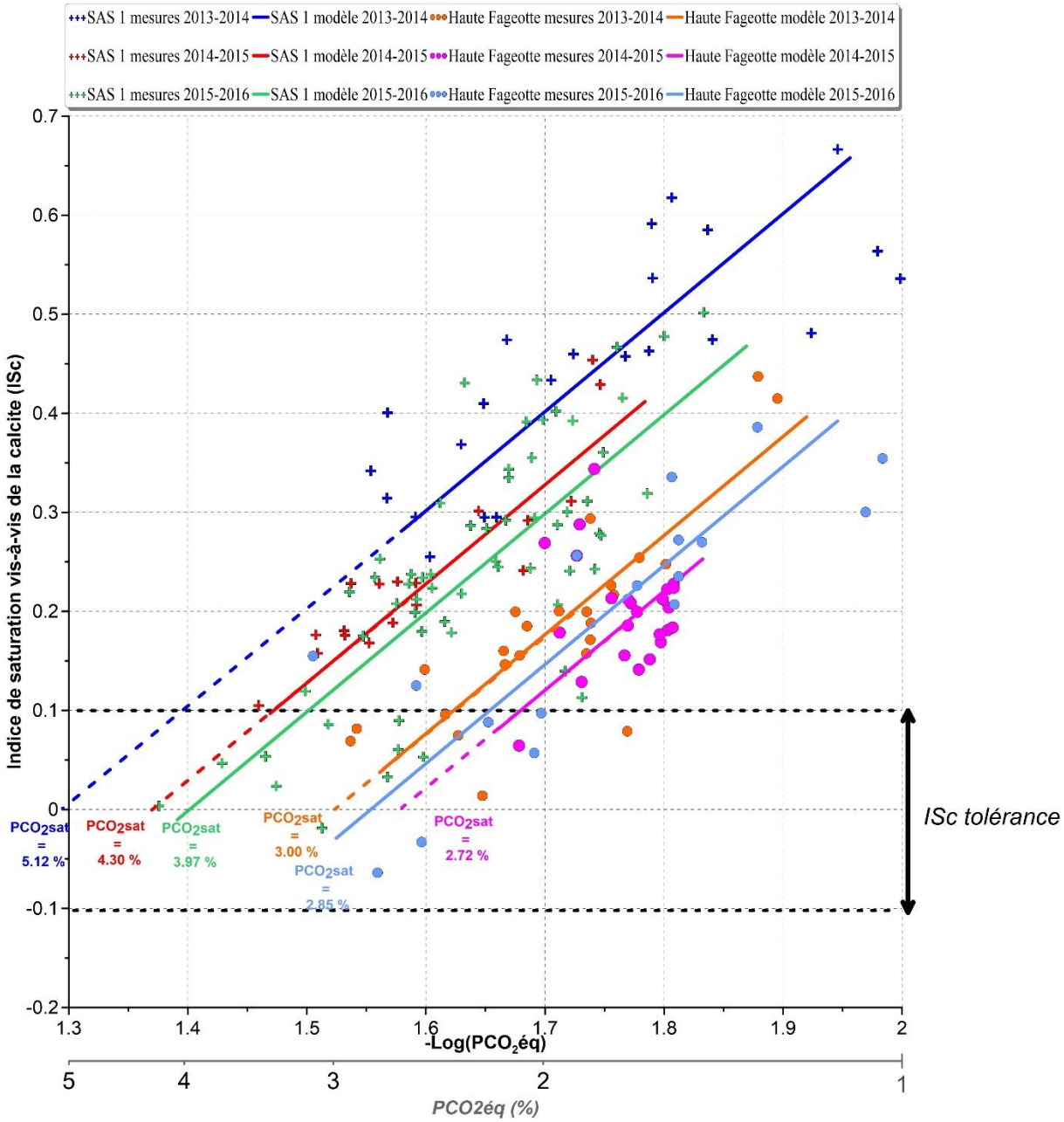


Figure V-24 : Position des mesures effectuées de 2013 à 2016 aux émergences de la Haute Fageotte dans le repère ISc = f(-log(PCO_2éq)). Les droites modèles sont présentées pour les deux émergences pour chaque cycle et prolongée si nécessaire en pointillés pour permettre une visualisation de la PCO_2sat moyenne de chaque modèle.

L'interprétation du diagramme ISc vs –log(PCO_2éq) et le calcul des droites modèles pour l'émergence épikarstique du SAS et la Haute Fageotte au cours des cycles 2013-2014 et 2014-2015 illustrent les différences déterminées à partir du traitement statistique.

De plus, en considérant chaque émergence indépendamment, il est possible de noter que les PCO_2sat moyennes de chaque cycle hydrogéologique sont différentes avec des valeurs évoluant entre 3.97 % (2015-2016) et 5.12 % (2013-2014) pour l'émergence épikarstique et de 2.72% (2014-2015) à 3.00 % (2.13-2014) pour la Haute Fageotte.

En comparant le positionnement des points de mesure de la Haute Fageotte, il est possible de discriminer des mesures comprises dans le domaine de l'émergence épikarstique ce qui vient confirmer les apports d'eau épikarstique qui soutiennent cet écoulement à certaines périodes de l'année.

Enfin, cette représentation graphique permet de mettre en évidence en plus de la variabilité spatiale, une variabilité temporelle importante pour ces deux émergences. Il convient donc à présent de s'intéresser aux facteurs impactant la variabilité temporelle de ces paramètres régissant les équilibres en calcite, air et eau.

V.3.4.2 Corrélation entre pression partielle de CO_2 dans l'épikarst et pression de CO_2 à saturation vis-à-vis de la calcite

Dans un premier temps, il convient de s'intéresser à l'impact de la variabilité temporelle des PCO_2 de l'air de l'épikarst (III.3) et celle des PCO_2sat de l'émergence épikarstique et de la source de la haute Fageotte. Pour cela, l'évolution des PCO_2sat aux deux émergences ainsi que celle de la PCO_2 de l'air mesurée en deux points de l'épikarst sont mises en parallèle dans la Figure V-25.

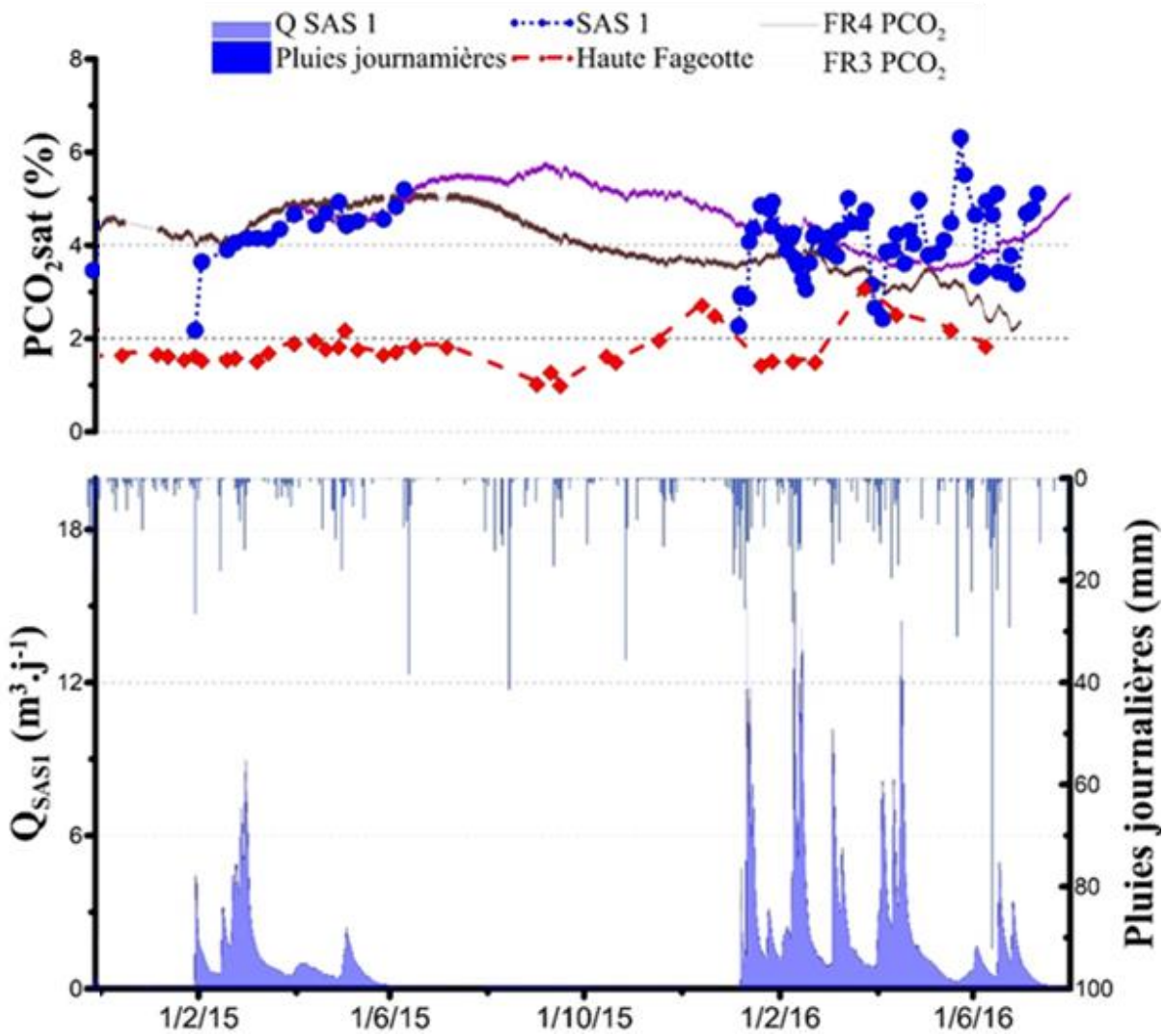


Figure V-25 : Evolution des PCO_2sat de l'émergence épikarstique et de la source de la Haute Fageotte mesurées de Janvier 2015 à Juillet 2016. Les PCO_2 enregistrées en continu dans les forages FR3 et FR4 de la parcelle expérimentale sont présentées en parallèle.

Trois informations importantes doivent être retenues. Dans un premier temps, les PCO_2 mesurées dans l'épikarst sont clairement supérieures aux PCO_2sat mesurées tout au long de la période d'étude à la source de la Haute Fageotte. Ceci confirme donc la présence d'un air moins chargé en CO_2 dans la zone d'infiltration de la colline de Lascaux qui conditionne une remise à l'équilibre des eaux durant leur infiltration à travers la zone non saturée.

Différemment, pour le cycle 2014-2015, les PCO_2sat de l'émergence épikarstique sont très similaires à celle enregistrées dans les forages de l'épikarst et notamment dans le forage le plus profond (FR4 8 mètres de profondeur) situé à 1 mètre près à la même profondeur que l'émergence. Cette corrélation est retrouvée tout au long du cycle d'écoulement venant ainsi confirmer la théorie de Peyraube et al. (2012) selon laquelle la PCO_2sat représente la PCO_2 minimale que l'eau a due rencontrer au cours de son infiltration pour acquérir sa minéralisation

carbonatée calcique. Le premier point de mesure fait toutefois exception à la règle avec une PCO_2sat bien inférieure à celle de l'air de l'épikarst.

De plus, cette corrélation bien que satisfaisante, devient moins claire pour le cycle hydrogéologique suivant. Il semblerait donc que la PCO_2sat de l'eau de l'émergence épikarstique est affectée soit par un autre air dont la PCO_2 est plus variable, ce qui n'est pas cohérent avec les conclusions du chapitre 3, soit par des mécanismes conduisant à une évolution des équilibres calco-carboniques après leur mise à l'équilibre avec la PCO_2 de l'air de l'épikarst superficiel. Les faibles valeurs de PCO_2sat étant particulièrement bien corrélée avec l'occurrence de crue au SAS 1, il est cohérent de penser que les conditions d'écoulement dans le compartiment épikarstique puissent être un facteur expliquant cette variabilité et notamment par un mélange avec une eau à faible PCO_2sat.

V.3.4.3 Variabilité des équilibres calco-carboniques liée aux conditions d'écoulement dans la zone vadose

Afin d'étudier l'influence potentielle des conditions d'écoulement sur les équilibres calco-carboniques des eaux à l'émergence épikarstique, l'évolution de ces paramètres est présentée dans la Figure V-26 pour le cycle hydrogéologique 2015-2016. Ce cycle est considéré car il donne un panorama d'ensemble sur les différentes conditions d'écoulement mises en évidence.

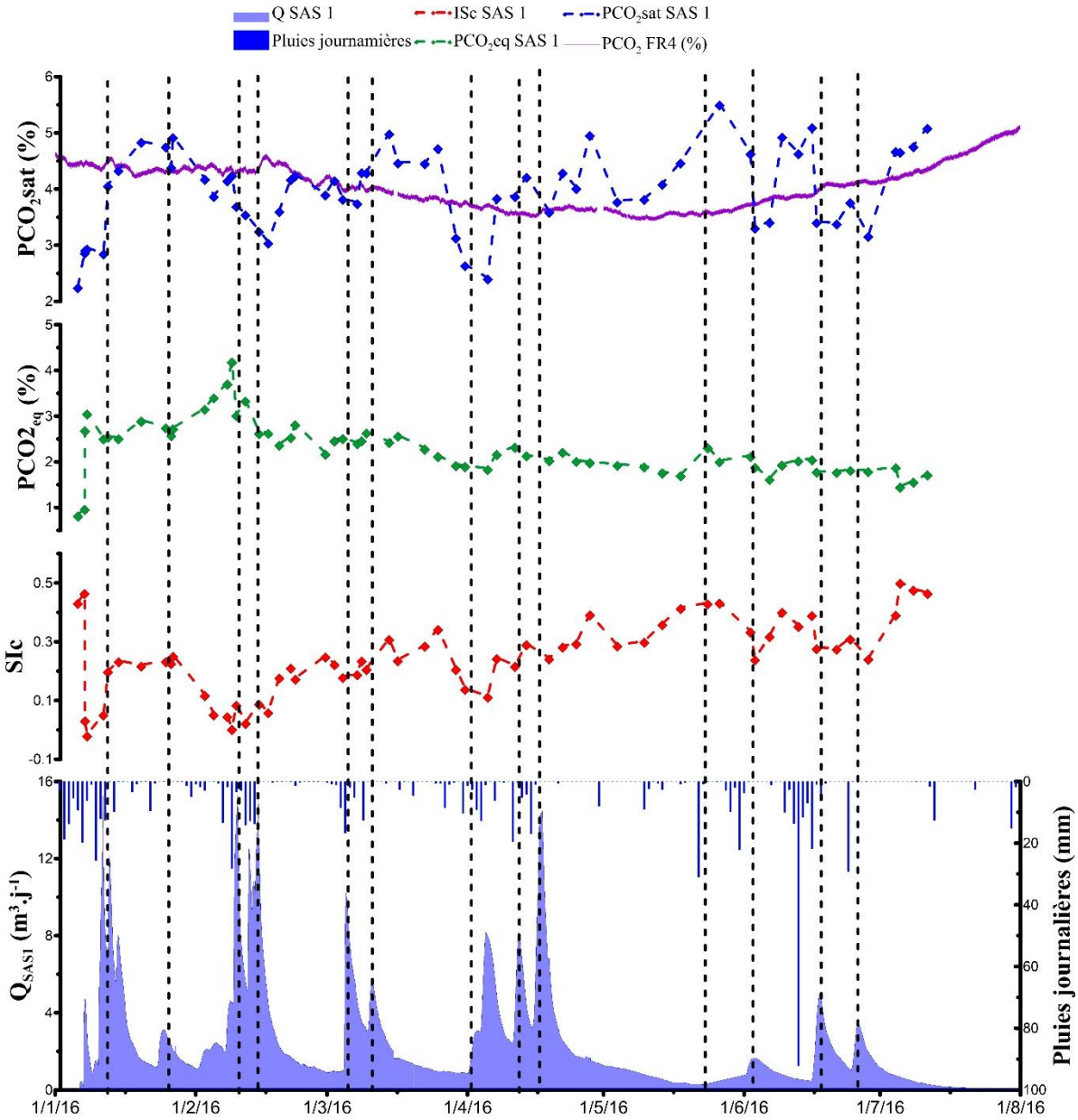


Figure V-26 : Evolution des paramètres décrivant les équilibres calco-carboniques des écoulements du SAS 1 pour le cycle hydrogéologique 2015-2016. Les pointillés signalent les pics de crues enregistrés au SAS 1. L'évolution de la PCO_2 mesurée dans le forage FR4 de la parcelle expérimentale est aussi présentée.

Une première observation conduit au constat suivant : les paramètres les plus impactés par les conditions d'écoulement et donc les plus variables sont l'ISc et la PCO_2sat. En effet, à l'exception des deux premiers points correspondant aux eaux de reprise d'écoulement, la PCO_2éq décroit continuellement au cours du cycle mais ne présente pas de variations importantes.

Ainsi, nous nous contenterons d'analyser l'évolution des signaux de PCO_2sat et d'ISc. Au début du cycle d'écoulement, les eaux présentent un ISc important et une PCO_2sat faible, synonymes de dégazage du CO_2 sans mise à l'équilibre avec la calcite (anomalies de mesure).

L'ISc chute ensuite clairement quand la PCO_2sat augmente légèrement semblant dénoter d'une eau ayant subi un dégazage de CO_2 accompagné de précipitation de calcite. Cette variation est expliquée par le temps de séjour important de ces eaux dans un système ouvert sur l'air du massif qui aurait donc une PCO_2 moins importante qu'en FR4. La première crue est ensuite concomitante avec une augmentation importante de la PCO_2sat qui devient alors concordante avec PCO_2 FR4. L'ISc augmente en conséquence montrant l'arrivée d'eau ayant dégazé sans précipiter au cours de son infiltration, la réserve épikarstique se met alors en place au cours de cet épisode. En effet, la PCO_2sat ainsi que l'ISc restent ensuite assez stables et concordantes avec l'évolution de la PCO_2 mesurée dans l'épikarst jusqu'au mois de Mai 2016 à l'exception de l'occurrence des crues importantes. Durant ces crues, des eaux présentant une PCO_2sat et un ISc plus faibles participent à l'écoulement. Ces eaux plus récentes selon les observations de la section précédente présentent une PCO_2sat plus faibles ce qui tend à montrer que la mise à l'équilibre de cette eau avec la phase gazeuse s'est fait dans un horizon de l'épikarst moins chargé en CO_2. L'ISc plus faible au cours de ces évènements va dans le sens d'une eau d'infiltration rapide ne dégazant que très peu du fait de la forte teneur en eau de l'épikarst. En effet, plus l'épikarst est saturé en eau, plus les échanges avec la phase gazeuse se sont restreints.

Suite à cette période, les eaux participant à l'écoulement en condition de débit de base montrent des valeurs de PCO_2sat beaucoup plus élevées que dans l'épikarst (6.0 % pour la PCO_2sat et seulement 4.0 % dans pour la PCO_2 de l'air de l'épikarst) et des ISc importants. Cet écart signifie donc que ces eaux se sont mises à l'équilibre avec un air fortement chargé en CO_2, mais qui n'est pas mesuré dans la parcelle expérimentale. Cette eau à long temps de séjour dans l'épikarst (ISc importante) est alors drainé en direction de l'exutoire jusqu'au tarissement de l'écoulement. Cette condition d'écoulement en milieu diphasique conduit en effet à un dégazage de l'eau lors de son arrivée dans un horizon moins chargé en CO_2 (PCO_2 de l'air< PCO_2éq). Les crues de faibles intensités se produisant pendant cette période sont accompagnées d'eau à faible temps de séjour n'ayant pas eu le temps de se mettre totalement à l'équilibre avec la PCO_2 de l'air de l'épikarst à 8 m de profondeur du fait de la faible teneur en eau du système qui conduit à des infiltrations rapides par les zones transmissives.

Ainsi, les conditions d'écoulement et la participation de différents types d'eau à plus ou moins long temps séjour dans l'épikarst conditionnent les équilibres calco-carboniques en sortie de l'épikarst.

V.3.5 Conclusions sur les modalités d'écoulement dans l'épikarst et de leur impact sur les équilibres calco-carboniques des eaux arrivant dans la cavité

L'étude détaillée des conditions d'écoulement dans l'épikarst à travers un suivi en continu de la conductivité électrique et de la concentration en COD a permis d'acquérir une finesse d'interprétation et de discriminer plusieurs comportements hydrodynamiques de l'épikarst de la cavité de Lascaux.

En effet, un premier constat a pu être posé quant à l'occurrence de conditions d'écoulement différentes selon la teneur en eau du massif épikarstique et donc de l'importance de la réserve épikarstique temporaire qui évolue au cours du temps. La participation d'eau d'infiltration rapide à travers les zones transmissives de l'épikarst est par exemple plus importante lorsque la réserve épikarstique est restreinte et inversement.

De plus, il a été démontré que des connections hydrauliques nouvelles s'établissant en période de forte teneur en eau du système peuvent conduire à la participation à l'exutoire d'écoulements provenant de zones qui étaient auparavant isolés du système étudié. Cette participation court-circuitant les infiltrations rapides transitant dans les zones transmissives a pour conséquence secondaire d'augmenter la zone de l'épikarst contribuant à l'écoulement. Cette variabilité de la zone dite « contributive » explique certainement les difficultés rencontrées par Lopez (2009) ou encore Minvielle (2015) dans leur modélisation des débits par des architectures réservoirs.

Ainsi, les conditions d'écoulement à l'échelle du cycle hydrogéologique, de l'évènement, mais aussi à l'échelle interannuelle montrent une variabilité importante. En effet, la comparaison des trois cycles d'écoulement nous a permis de démontrer l'importance des conditions hydroclimatiques externes sur la constitution d'une réserve épikarstique plus ou moins importante notamment avant la reprise des écoulements. Les premiers écoulements enregistrés dans la cavité ont alors montrés des concentrations en COD analogues à celles mesurées dans les sols dénotant ainsi de l'arrivée à l'exutoire d'infiltrations rapides par les zones transmissives.

La comparaison des signaux chimiques de l'émergence épikarstique avec ceux de la Haute Fageotte (aquifère perché) a permis de distinguer les périodes de l'année au cours desquelles les participations d'eau épikarstique sont importantes et notamment durant les périodes de crue. Néanmoins, l'absence de mesures en continu analogues à celles effectuées à

l‘émergence épikarstique n’a pas permis une interprétation des conditions d’écoulement aussi précise que pour l’épikarst.

L’étude des équilibres calco-carboniques des écoulements épikarstiques du SAS 1 a montré des eaux systématiquement sursaturées à saturées vis-à-vis de la calcite qui auraient donc tendance à précipiter au cours de leur arrivée dans une atmosphère moins chargée en CO_2 que dans l’épikarst (cavité, atmosphère extérieur). Parallèlement, il a été démontré que la variabilité des PCO_2sat de l’émergence épikarstique est fortement conditionnée par la PCO_2 de l’air de l’épikarst. Cependant, la relation entre ces deux paramètres diminue lorsque plusieurs types d’eau l’équilibre avec différentes PCO_2 de l’air dans différents compartiments de l’épikarst participent à l’écoulement.

Enfin, une croissance lente et continue de la conductivité de l’eau au cours du cycle d’écoulement a été observée. Cette augmentation classiquement attribuée à un temps de résidence plus important de l’eau dans le système semble être plutôt concordante avec l’augmentation de la PCO_2 de l’air de l’épikarst au cours du cycle d’écoulement. Ainsi, le gazage de ces eaux leur permet *in-fine* d’acquérir une minéralisation plus importante qui n’aurait pas pu être acquise sans une augmentation de la PCO_2 de l’épikarst. Ce constat montre donc l’importance de prendre en compte l’évolution de la PCO_2 de l’air du massif karstique pour mieux appréhender les variations de la conductivité électrique mesurées à l’exutoire des systèmes karstiques.

V.4 Développement d'une méthodologie de simulation hydrogéochimique du comportement des eaux de condensation et d'exfiltration aux parois de la cavité de Lascaux

Une des problématiques de ces travaux de thèse était d'apporter des réponses quant aux potentielles altérations des parois résultantes de l'aérologie de la cavité et notamment de la dynamique du CO_2. En effet, il est attendu de préciser les impacts potentiels des différents types d'eau présents aux parois ornées selon l'évolution des paramètres microclimatiques et de la PCO_2 de l'air de la cavité.

Dans cette optique, il a été entrepris de s'appuyer sur les connaissances acquises depuis les premières études de l'environnement naturel de la cavité, mais aussi et surtout sur les différents mécanismes aérologiques et physico-chimiques décrits au cours des chapitres III, 0 et V de ce manuscrit de thèse. Elles serviront à contraindre les hypothèses nécessaires pour la simulation hydrogéochimiques de l'équilibre des eaux aux parois de la cavité.

Cette partie présentera dans un premier temps les enjeux de l'étude des équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux, pour poursuivre par l'explication de la démarche de simulation accompagnée de la description de l'impact de chaque paramètre d'entrée sur le résultat final de la simulation. Pour terminer, une application de la méthode sera mise en œuvre pour la paroi gauche de la Salle des Taureaux en contexte de pompage puis en contexte naturel. La comparaison de ces deux cas nous permettra alors de discuter de l'impact du pompage sur les processus de dissolution-précipitation.

V.4.1 Enjeux de l'étude des équilibres calco-carboniques des eaux aux parois

Deux types d'eau sont couramment rencontrés aux parois des cavités karstiques de la zone vadose :

- Les eaux de condensation qui sont la résultante d'un déséquilibre entre l'humidité absolue présente dans l'air de la cavité, et l'humidité potentielle de l'air présente dans la porosité de la paroi. Cette différence est la conséquence de la présence d'un gradient de température entre l'air et la paroi. En effet, lorsque la température de l'air est supérieure à celle de la paroi, l'humidité absolue maximale présente dans la phase gazeuse est supérieure à celle de la paroi. Il se produit alors de la condensation sur la paroi par équilibration entre les deux phases. L'humidité relative de l'air de la cavité de Lascaux étant proche de 100

%, ce processus physique est susceptible de se produire tout au long de l'année. Dans la configuration inverse (température de la paroi plus chaude que celle de l'air), l'évaporation de l'eau potentiellement présente à la paroi se produit (ce cas de figure ne sera pas simulé dans ce manuscrit).

- Les eaux d'infiltration ou d'exfiltration selon leur mode d'écoulement, peuvent se retrouver sur les parois des cavités de la zone vadose. Dans le cas de la cavité de Lascaux, les eaux d'infiltration de l'émergence épikarstique du SAS 1 sont récupérées et évacuées de la cavité. Elles ne posent donc pas de problèmes particuliers du point de vue des parois ornées. A contrario, des exfiltrations se produisent temporairement aux parois ornées de la Salle des Taureaux.

Deux problèmes principaux apparaissent lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de la calcite aux parois d'une cavité sous l'influence de ces deux types d'eau :

- La précipitation de calcite qui peut à terme recouvrir totalement les ornements comme cela est visible dans plusieurs cavités de la région comme par exemple celle de Font de Gaume (Les Eyzies de Tayac), ou encore provoquer la chute d'écaille comme cela est visible dans plusieurs zones de la cavité de Lascaux et notamment la Salle des Taureaux. Ce phénomène est la résultante de la mise à l'équilibre des eaux d'infiltration lors de leur mise en contact avec l'atmosphère de la cavité. Parallèlement, ce processus de précipitation peut aussi être rencontré en cas d'évaporation d'une eau d'infiltration ou de condensation qui se serait mise à l'équilibre avec la paroi auparavant (cas non traité ici). La Figure V-27 présente un schéma conceptuel du processus de précipitation de calcite sur une paroi. Au cours de son infiltration dans l'épikarst et la zone de transmission, l'eau acquiert une minéralisation carbonatée calcique sous l'influence de la forte PCO_2 de l'air du sol et de l'épikarst (Cf. Chapitre 3). Lors de son arrivée dans la cavité, si la PCO_2 de l'air de la cavité est inférieure à la PCO_2 à saturation de l'eau (PCO_2 air < PCO_2 sat), le CO_2 dissous en excès dans la phase aqueuse est dégazé pour atteindre un équilibre avec la phase gazeuse (considérée comme en excès), entrainant alors la précipitation des ions calcium et bicarbonate sous forme de calcite néoformée.

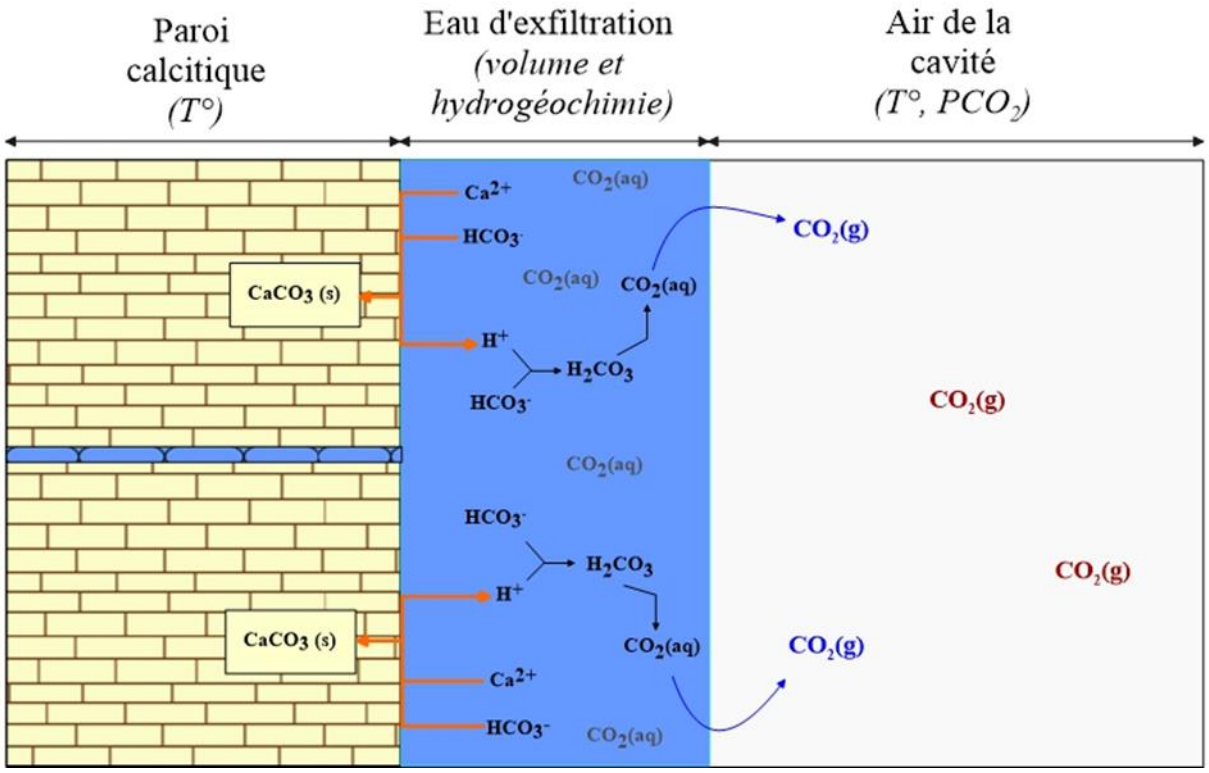


Figure V-27 : Schéma conceptuel du processus physico-chimique à l'origine de la précipitation de calcite (flèches orange) par la mise à l'équilibre des eaux d'exfiltration aux parois d'une cavité. La configuration de l'arrivée de l'eau par exfiltration à travers un joint stratigraphique utilisée ici est semblable à celle de la paroi gauche de la Salle des Taureaux. Les paramètres en italiques représentent les principales grandeurs physico-chimiques de chaque phase impliquée dans le processus de précipitation.

- La dissolution de la calcite peut quant à elle affecter le support calcitique mais aussi le ciment calcitique s'étant déposé après les peintures et qui peut jouer un rôle de protection. En cas de dissolution de ce film de calcite, les pigments peuvent alors être mobilisés par les écoulements d'eau et d'air sur la paroi (érosion mécanique). Une concentration en CO_2 importante dans l'air de la cavité (0) peut induire une forte PCO_2eq dans les solutions aqueuses présentes aux parois et notamment dans les eaux de condensation. Le pouvoir de corrosion de ces eaux est alors suffisant pour permettre une altération physico-chimique par mise à l'équilibre de la solution avec la calcite des parois. La Figure V-28 reprend les principales étapes de ce processus de dissolution de la calcite par une eau de condensation.

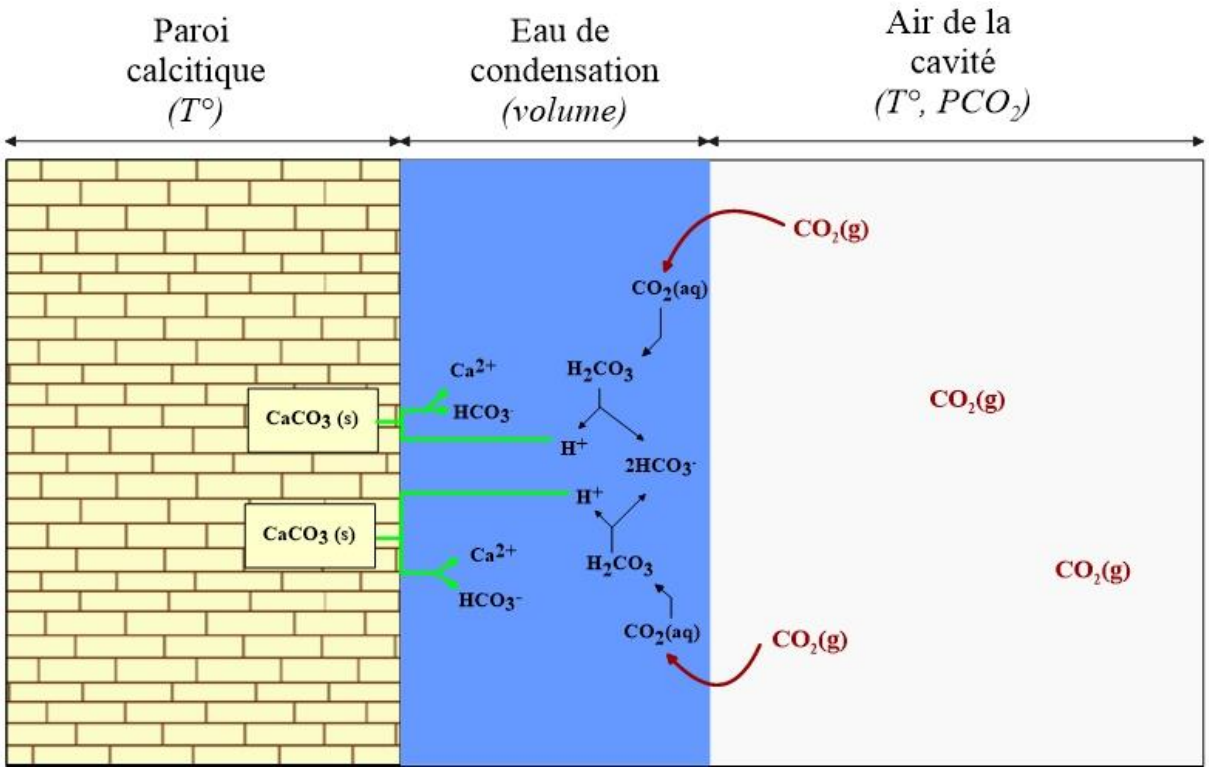


Figure V-28 : Schéma conceptuel du processus physico-chimique à l'origine de la dissolution de calcite sur une paroi (flèches verte) par la mise à l'équilibre de l'eau de condensation chargée en CO_2 de l'air de la cavité. Les paramètres en italiques représentent les principales grandeurs physico-chimiques de chaque phase impliquée dans le processus de précipitation.

La méthodologie développée doit donc permettre de quel processus (dissolution-précipitation) est susceptible de se déclencher aux parois d'une cavité selon les conditions hydroclimatiques et de PCO_2. Dès lors, il est évident que cette démarche devra prendre en compte les différents paramètres microclimatiques et physico-chimiques conditionnant ces réactions.

V.4.2 Méthodologie et limites de la démarche de simulation développée

V.4.2.1 Description générale de la démarche de simulation

La méthodologie de simulation développée pour estimer l'impact potentiel des eaux de condensation et d'exfiltration aux parois de la cavité de Lascaux est basée sur trois étapes principales que sont :

- Le choix et l'attribution de valeurs aux paramètres physico-chimiques et microclimatiques d'entrée du modèle. Cette première phase est réalisée en prenant en compte les informations relatives à la dynamique du CO_2 dans l'épikarst et la cavité, la microclimatologie de la cavité mais aussi aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'exfiltration déterminées à partir des conditions d'écoulement et du marquage chimique des eaux d'infiltration

dans la zone vadose. Du fait de l'incertitude relative à certains paramètres tels que le volume d'eau aux parois ou encore le signal hydrochimique de l'eau d'exfiltration (impossibilité technique de prélever cette eau), plusieurs configurations seront considérées.

- La réalisation des différentes simulations pour chaque jeu de paramètre sélectionné. Ces dernières sont effectuées à l'aide du logiciel PHREEQC développé par Appelo et Parkhurst (1998). L'état final de chaque simulation permet alors de calculer les masses de calcite dissoutes ou précipitées pour chaque configuration. Par la suite, pour faciliter la démarche d'application à une paroi réelle, des relations numériques liant la PCO_2 de l'air (paramètre mesuré en continu dans la cavité) et la masse de calcite dissoute ($mCaCO_3d$) et précipitée ($mCaCO_3p$). Cette réduction de modèle permet alors d'estimer directement à partir de la teneur en CO_2 de l'air, la masse de calcite affectée par litre d'eau présent à la paroi.
- L'application des relations numériques à une paroi réelle de la cavité de Lascaux (paroi gauche de la Salle des Taureaux dans ce manuscrit). Cette étape nécessite de disposer de mesures de PCO_2 en continu, mais aussi dans le cas de la condensation, de mesures de la température de l'air et de la paroi pour permettre l'estimation du volume d'eau présent à la paroi. Les masses de calcite précipitée ou dissoute peuvent alors être estimée au pas de temps choisi (dans ce manuscrit, un pas de temps hebdomadaire est considéré).

Les Figure V-29 et Figure V-30 récapitulent cette démarche de simulation pour les cas de l'eau de condensation et d'exfiltration. La démarche ne varie que très peu pour ces processus à l'exception de l'estimation du volume d'eau présent en paroi et de la chimie initiale de la solution considérée.

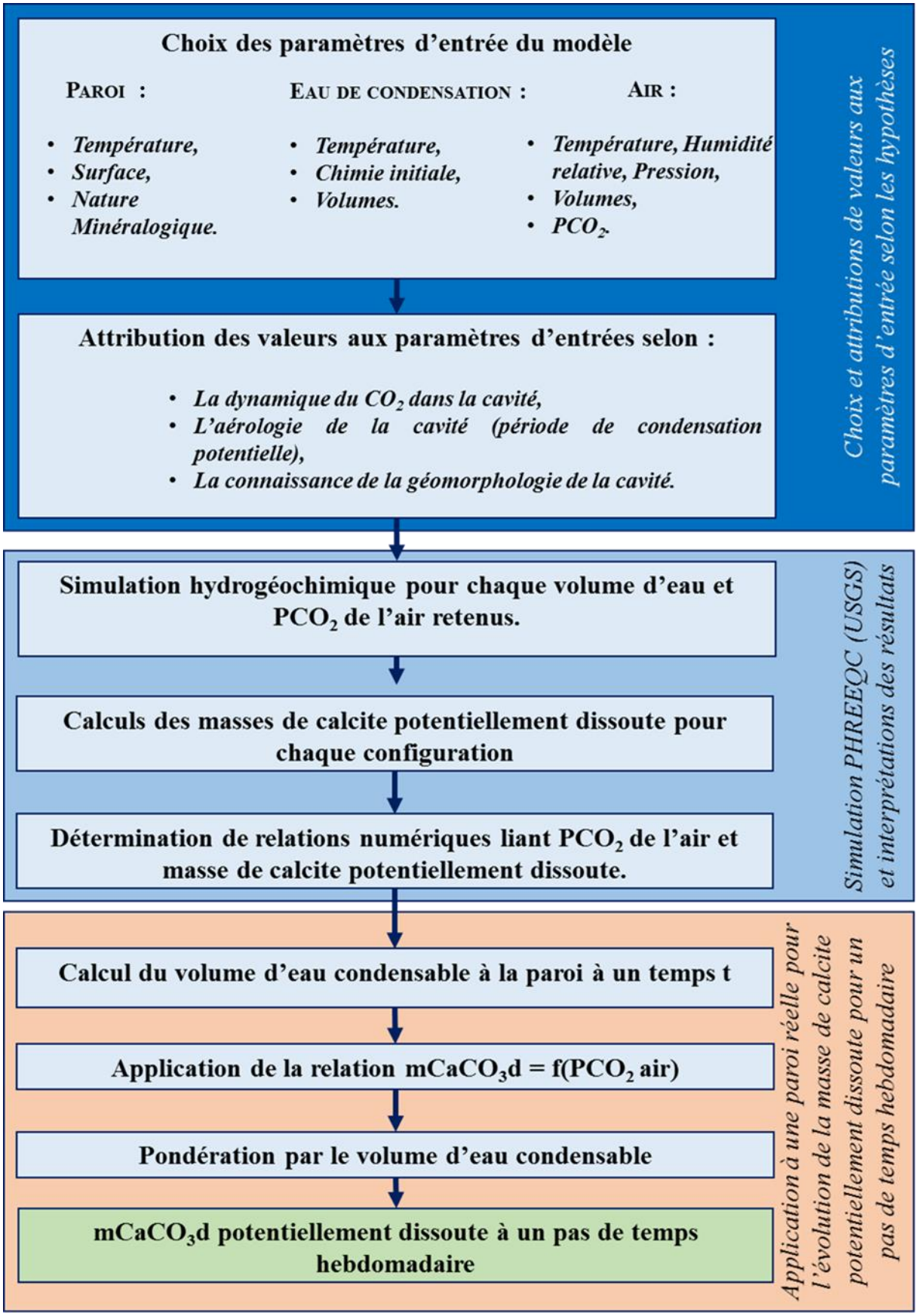


Figure V-29 : Démarche de simulation de l'impact des eaux de condensation aux parois de la cavité de Lascaux.

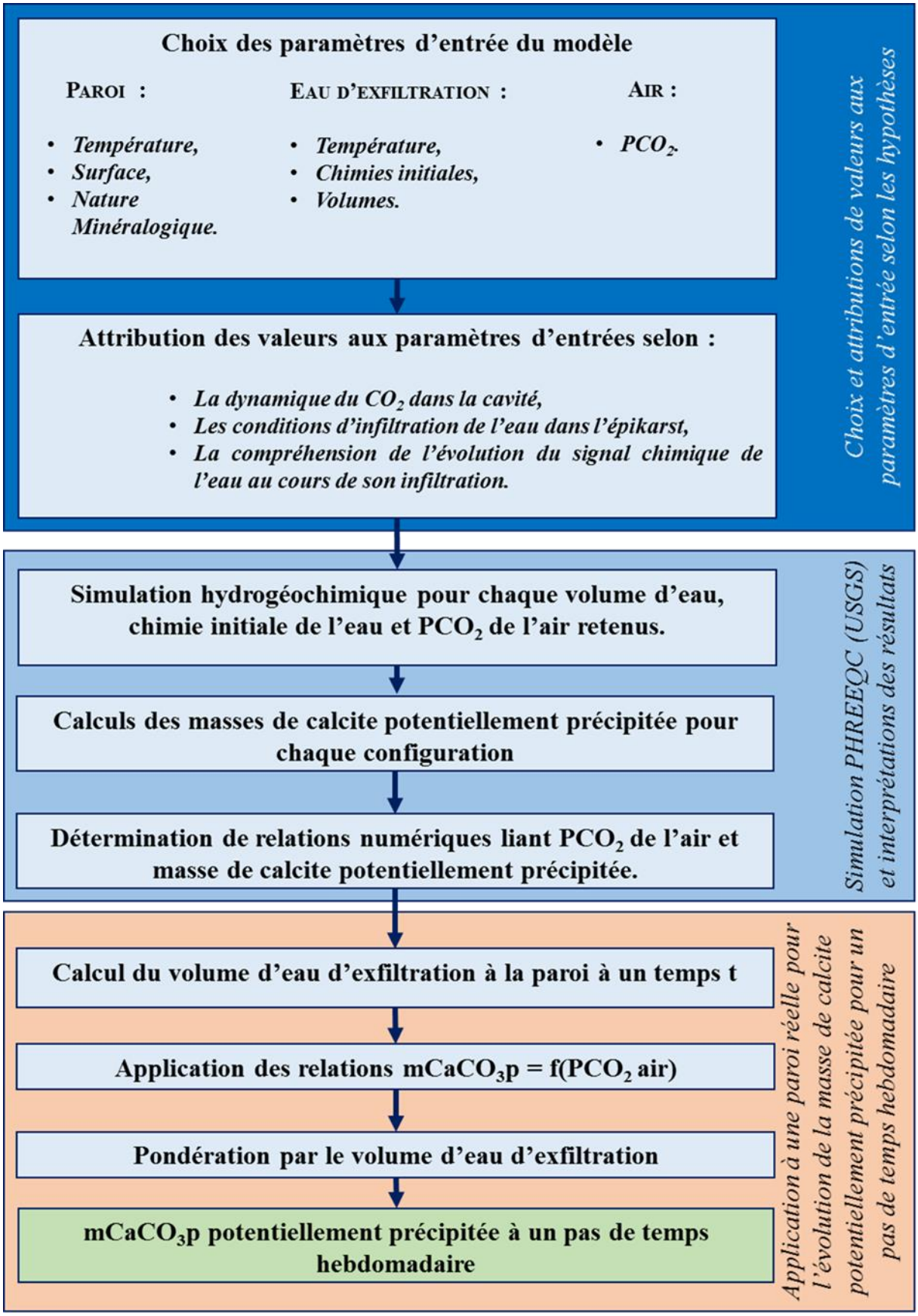


Figure V-30 : Démarche de simulation de l'impact des eaux d'exfiltration aux parois de la cavité de Lascaux.

V.4.2.2 Choix et attribution de valeurs aux paramètres d'entrée

La géochimie de l'eau de condensation est supposée comme étant semblable à celle d'une eau non minéralisée ayant une faible PCO_2eq originelle.

L'eau d'exfiltration est considérée comme similaire à la fin du cycle d'écoulement de l'émergence épikarstique. Les écoulements aux joints stratigraphiques se produisant avec un retard par rapport aux écoulements du SAS, il est fort probable que l'eau d'exfiltration provienne de la réserve d'eau encore présente dans l'épikarst qui est ensuite lentement drainée vers la profondeur écoulement de type fissural. Cependant, cette infiltration lente à travers le massif doit certainement influencer le signal hydrochimique de l'eau en permettant une mise à l'équilibre avec la PCO_2 de l'air du massif. C'est pourquoi, pour transcrire la chimie des eaux d'exfiltration aux joints de la Salle des Taureaux, cette eau est considérée comme à l'équilibre avec la calcite (ISc = 0). Pour cela, les concentrations de l'ion bicarbonate, du calcium et le pH sont ajustés avant toute simulation. Deux cas sont considérés, une eau ayant rencontré une PCO_2 de 5 % dans le massif comme mesurée dans la parcelle (PCO_2sat = 5%), et une autre ayant rencontré une PCO_2 de 3 % analogue à celle du Cabinet des Félins, zone isolée de l'atmosphère de la cavité (PCO_2sat = 3%).

Les PCO_2 de l'air considérées au cours des simulations évoluent de 0.04 %(atmosphère) à 5 % (teneur maximale enregistrée dans la cavité). Le support calcitique est de la calcite pure ($CaCO_3$s). La température de l'eau est fixée à partir de la température moyenne de la cavité au cours de l'année (12.6°C). En effet, l'écoulement de l'eau étant lent, cette dernière peut être considérée à l'équilibre thermique avec la paroi. Les volumes d'eau considérés sont pour cette étape fixés par avis d'expert et évoluent de 0.0025 à 1 litre par mètre carré de support calcitique. Les différentes valeurs retenues pour les paramètres d'entrée du modèle sont résumées dans le Tableau V-9.

Tableau V-9: Principales données d'entrée du modèle pour les simulations des masses de calcite précipitée ou dissoute.

***Types de simulation*/ Entrées**	**Air de la cavité**		**Hydrochimie initiale des eaux**				
	Températures (°C)	**PCO_2 (%)**	**pH**	**$[HCO_3^-]$ (mg/L)**	**$[Ca^{2+}]$ (mg/L)**	**SIc**	**$PCO2_{sat}$ (%)**
Condensation	12.6	0 - 5	5.3	0	0	0	néant
Exfiltration	12.6	0 - 5	7.3	440	150	0	3 et 5

V.4.2.3 Simulations hydrogéochimiques par le code PHREEQC et calcul de la masse de calcite dissoute ou précipitée théorique

Pour le cas de l'eau de condensation, deux étapes sont nécessaires à la réalisation de la simulation :

- Mise à l'équilibre de l'eau non minéralisée (volume variable) avec l'air (PCO_2 variable),
- Mise en contact avec le support calcitique et enregistrement de l'évolution du signal chimique de l'eau à un pas de temps constant jusqu'à l'atteinte de l'équilibre entre les phases solides (calcite), aqueuse (condensation) et gazeuse (air de la cavité). La calcite solide ainsi que l'air de la cavité sont considérés comme des réservoirs infinis.

Pour les eaux d'exfiltration, deux étapes sont aussi nécessaires :

- Mise à l'équilibre de l'eau considérée avec la calcite avec une PCO_2 de l'air du massif de 3 ou 5 %,
- Mise en contact de l'eau avec l'air de la cavité (PCO_2 variable) avec le support calcitique et enregistrement du signal chimique de l'eau jusqu'à l'atteinte de l'équilibre entre les trois phases (ISc = 0).
- Ces étapes sont répétées pour chaque configuration de simulation (PCO_2 de l'air et volume d'eau variable.

L'équation 36 est ensuite utilisée pour calculer la masse de calcite dissoute ou précipitée par litre d'eau et par mètre carré de support (m_{CaCO3} in $g.m^{-2}.L^{-1}$). Cette estimation est basée sur la différence de concentration en ion calcium (Ca^{2+}) entre l'état initial de l'eau et l'état final (ISc = 0).

$$m_{CaCO3} = \frac{([Ca^{2+}]_i - [Ca^{2+}]_f) * M_{CaCO3}}{S_c} = \frac{\Delta[Ca^{2+}] * M_{CaCO3}}{S_c} \quad (36)$$

Avec $\Delta[Ca^{2+}]$ la différence entre$[Ca^{2+}]_i$ et $[Ca^{2+}]_f$ la concentration en calcium initiale et finale déterminée par PHREEQC ($mol.L^{-1}$) (condensation ou exfiltration), M_{CaCO3} la masse molaire de la calcite ($g.mol^{-1}$) et S_c la surface de contact entre calcite et solution aqueuse (m^2).

V.4.2.4 Estimations des volumes d'eau de condensation et d'exfiltration aux parois

Pour le cas de la corrosion, l'utilisation des différences de température entre air et roche permet de déterminer le gradient thermique entre ces deux phases. Plus le gradient de

température entre l'air et la roche est important, plus la condensation est susceptible de se produire sur le mur. Pour la même humidité relative (près de 100% dans la cavité), l'humidité absolue de la masse de l'air chaud sera supérieure à celle de l'air de la paroi plus froide. L'excès d'humidité dans la masse d'air chaud sera compensé par la condensation sur la paroi froide. Il est alors possible d'approcher à un moment t, le volume potentiel d'eau de condensation sur une paroi quelconque (V_w en L) avec l'équation 37 :

$$V_w = m_a * (H_a - H_r) = V_a * \rho_a * (H_a - H_r) \quad (37)$$

Avec m_a la masse d'air humide (kg), H_a et H_r, l'humidité absolue de l'air et de l'air de la paroi (kg d'eau.kg^{-1} d'air humide), V_w le volume d'eau de condensation (L), V_a le volume d'air (m^3) et ρ_a la masse volumique de l'air (kg.m^{-3}). L'humidité des différentes masses d'air est obtenue à partir de l'équation 38 :

$$H = \frac{M_{H2O}}{M_a} * \left(\frac{e'_w}{P - e'_w}\right) \quad (38)$$

Avec M_{H2O} la masse molaire de l'eau (g.mol^{-1}), Ma la masse molaire de l'air sec (g.mol^{-1}), e'$_w$ la pression de vapeur saturante (Pa) et P la pression atmosphérique interne (Pa). La pression de vapeur saturante est déterminée à l'aide de l'équation 39 en considérant θ la température (°C) et les coefficients empiriques tirés de l'ouvrage de Lismonde (2002) :

$$e'_w = 610{,}78 * \exp\left(\frac{17.08085 * \theta}{234.175 + \theta}\right) \quad (39)$$

Le volume d'eau d'exfiltration à un instant t est estimé à l'aide d'observations in situ (surface affectée et épaisseur du film d'eau en paroi). Ce volume est considéré comme constant et égal à 0,5 litre au long de l'année dans le cas de la paroi gauche de la Salle des Taureaux.

Ces différents volumes (V_w) permettent alors de pondérer les masses de calcite dissoute ou précipitée potentiellement à un instant t (m'$_{CaCO3}$ en g) à partir de l'équation 40 pour une paroi particulière:

$$m'_{CaCO3} = m_{CaCO3} * V_w \quad (40)$$

V.4.2.5 Les limites de la simulation numérique pour l'étude des processus de dissolution et de précipitation de calcite aux parois

Du fait de difficultés techniques mais aussi de l'intérêt archéologique des différentes parois de la cavité de Lascaux, il a été nécessaire de fixer certaines hypothèses sur les valeurs des paramètres d'entrée. Ces difficultés sont les suivantes :

- Impossibilité pratique de mesurer le débit des exfiltrations aux parois de la cavité. C'est pourquoi le volume d'eau en paroi est fixé par avis d'expert (observations in-situ).
- Impossibilité de prélever l'eau d'exfiltration dans des conditions convenables et donc de déterminer précisément le signal chimique des eaux d'exfiltration et encore moins sa variabilité. Ce dernier a donc été fixé à partir des connaissances acquises sur les conditions d'écoulement et de PCO_2 de l'épikarst.
- Impossibilité de mesurer le volume d'eau de condensation sur les parois et encore moins l'évolution de ce dernier. C'est pourquoi, son estimation se base sur l'interprétation des différences d'humidité absolue déterminée en continu à partir des mesures de température.
- Impossibilité de spatialiser les zones affectées par la condensation. Les estimations de la masse de calcite dissoute seront donc effectuées pour une paroi entière bien qu'il soit connu que la condensation se produit dans des zones particulières de chaque paroi.
- Impossibilité de mesurer la rugosité de la paroi. Les simulations seront donc réalisées sur un support lisse.

Ces difficultés soulignent une limite importante qui est l'impossibilité de réaliser un bilan pour une période donnée de l'évolution de la calcite sur une paroi. En effet, sans connaitre l'évolution des volumes d'eau aux parois (évaporation, variations du débit des exfiltrations), il est impossible d'effectuer ces bilans. La méthode développée permet cependant de déterminer un potentiel de dissolution ou de précipitation de calcite pour une eau présente en paroi à un instant t.

V.4.3 Estimation de la masse de calcite affectée théorique et de l'impact des principaux paramètres d'entrée sur le résultat final

V.4.3.1 Résultats des simulations de la masse de calcite théorique affectée par des eaux de condensation et d'exfiltration

Les résultats des simulations du comportement des eaux de condensation et d'exfiltration (PCO_2sat de 3 et 5%) sur le support calcitique considéré sont résumés dans le Tableau V-10. Ces résultats sont présentés en gramme de calcite dissoute ou précipitée par litre d'eau et par mètre carré de support calcitique ($mCaCO_3$).

Tableau V-10: Masses de calcite précipitées ou dissoutes ($mCaCO_3$) pour un litre d'eau et un mètre carré de support calcitique selon la PCO_2 de l'air de la cavité.

PCO_2 de l'air de la grotte (%)	**$mCaCO_3$ ($g.L^{-1}.m^{-2}$) dissoute par la condensation**	**$mCaCO_3$ ($g.L^{-1}.m^{-2}$) déposée par l'eau d'exfiltration (PCO_2sat = 3.00 %)**	**$mCaCO_3$ ($g.L^{-1}.m^{-2}$) déposée par l'eau d'exfiltration (PCO_2sat = 5.00 %)**
0.1	0.09	0.21	0.28
0.5	0.16	0.14	0.21
1	0.20	0.10	0.16
1.5	0.23	0.07	0.13
2	0.26	0.04	0.10
2.5	0.28	0.02	0.08
3	0.30	0	0.06
4	0.34		0.04
5	0.37		0

Pour la condensation, plus la PCO_2 de l'air est élevée, plus la masse de carbonate de calcium dissoute est importante. Pour une PCO2 de l'air de 0,1 et 3,0%, les masses de calcite corrodées sont respectivement de 0,09 et 0,37 $g.L^{-1}.m^{-2}$. Pour l'eau d'exfiltration, les simulations ont montré que plus la différence entre la PCO_2 d'air et la PCO_2sat de l'eau est élevée, plus le dépôt de carbonate de calcium est important. Ce dépôt de calcite est compris entre 0 $g.L^{-1}.m^{-2}$ quand la $PCO2_{sat}$ et la PCO_2 de l'air sont similaires, et 0.28 $g.L^{-1}.m^{-2}$ pour une $PCO2_{sat}$ de 5.00 % et une PCO_2 de l'air de 0.1 %.

V.4.3.2 Impacts des paramètres d'entrée

V.4.3.2.1 Impact du gradient de température entre air et paroi sur le volume d'eau condensable calculé

La Figure V-31 montre la corrélation entre le volume d'eau condensable (V_w) et la différence de température entre air et roche de la paroi gauche de la Salle des Taureaux. Ici

nous nous sommes placés dans le cas le plus défavorable pour la conservation des parois en considérant que tout le volume d'air de la Salle des Taureaux (500 m^3) était susceptible de condenser sur la seule paroi gauche

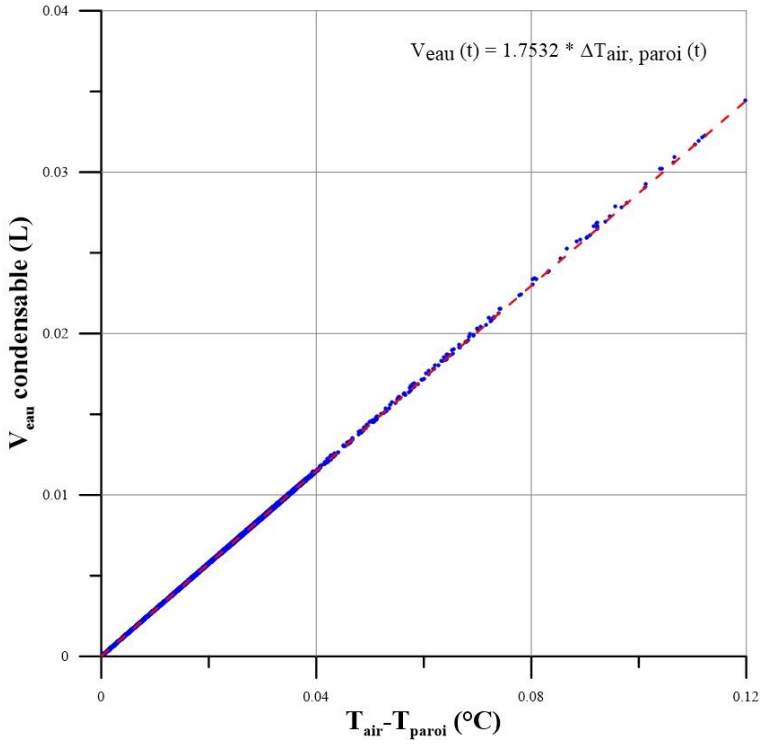


Figure V-31 : Corrélation entre volume d'eau condensable et différence de température entre air et paroi gauche de la Salle des Taureaux pour les années 2014 et 2015.

L'analyse graphique montre que le volume d'eau potentiellement condensable sur la paroi gauche (surface de la paroi d'environ 125 m^2) évolue de 0 L à 0.034 L. De plus, malgré la prise en compte de nombreux paramètres tels que la masse volumique de l'air humide, la pression de vapeur saturante ou encore l'humidité absolue, une corrélation directe est observée entre le volume d'eau condensable et le gradient de température entre l'air et la paroi. Ainsi, il est alors cohérent d'utiliser cette relation pour s'affranchir des équations 37, 38 et 39 qui deviendraient lourdes à utiliser pour estimer ce volume condensable à un pas de temps resserré. Nous attirons tout de même l'attention du lecteur sur le fait que cette relation n'est valable que pour la Salle des Taureaux. En effet, un des facteurs importants de ce calcul est le volume d'air susceptible de perdre son excès d'humidité absolue par condensation sur la paroi. Pour une application dans plusieurs salles de la cavité, il sera nécessaire de déterminer une relation par salle.

V.4.3.2.2 Impact du volume d'eau sur les masses de calcite dissoutes et précipitées

Les données issues des différentes simulations hydrogéochimiques apportent des précisions quant à l'influence du volume d'eau sur les masses de calcite dissoute (Figure V-32) et précipitée (Figure V-33).

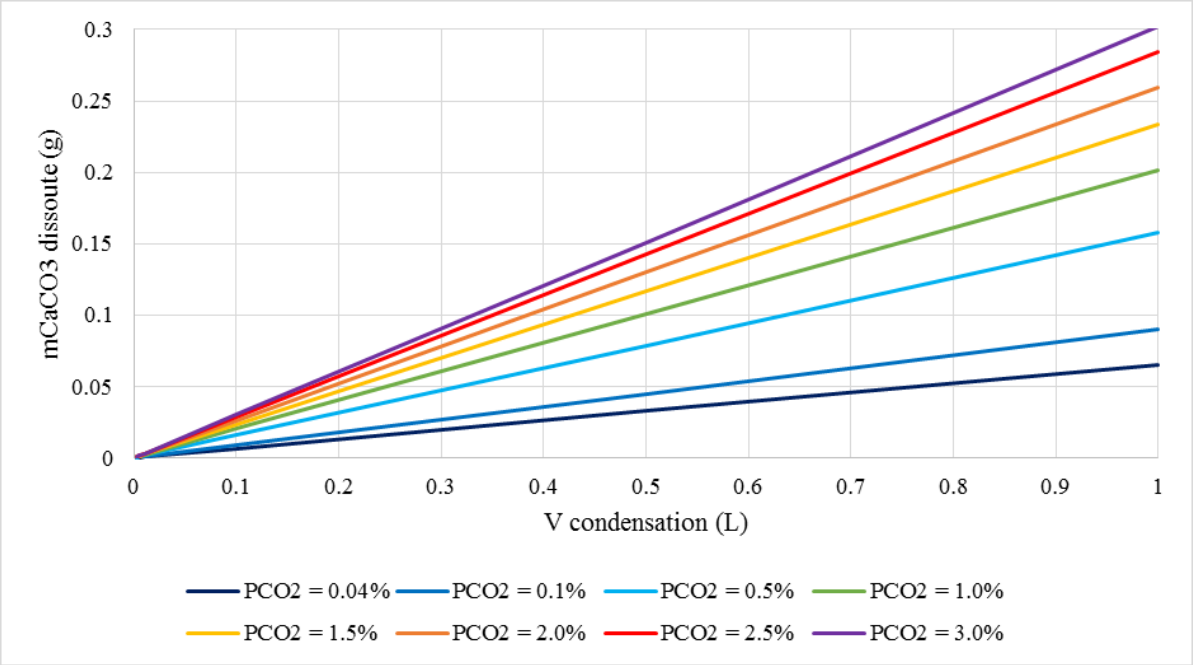


Figure V-32 : Relation entre volume d'eau et masse de calcite dissoute ($mCaCO_3$ dissoute) pour des PCO_2 de l'air de la cavité différentes.

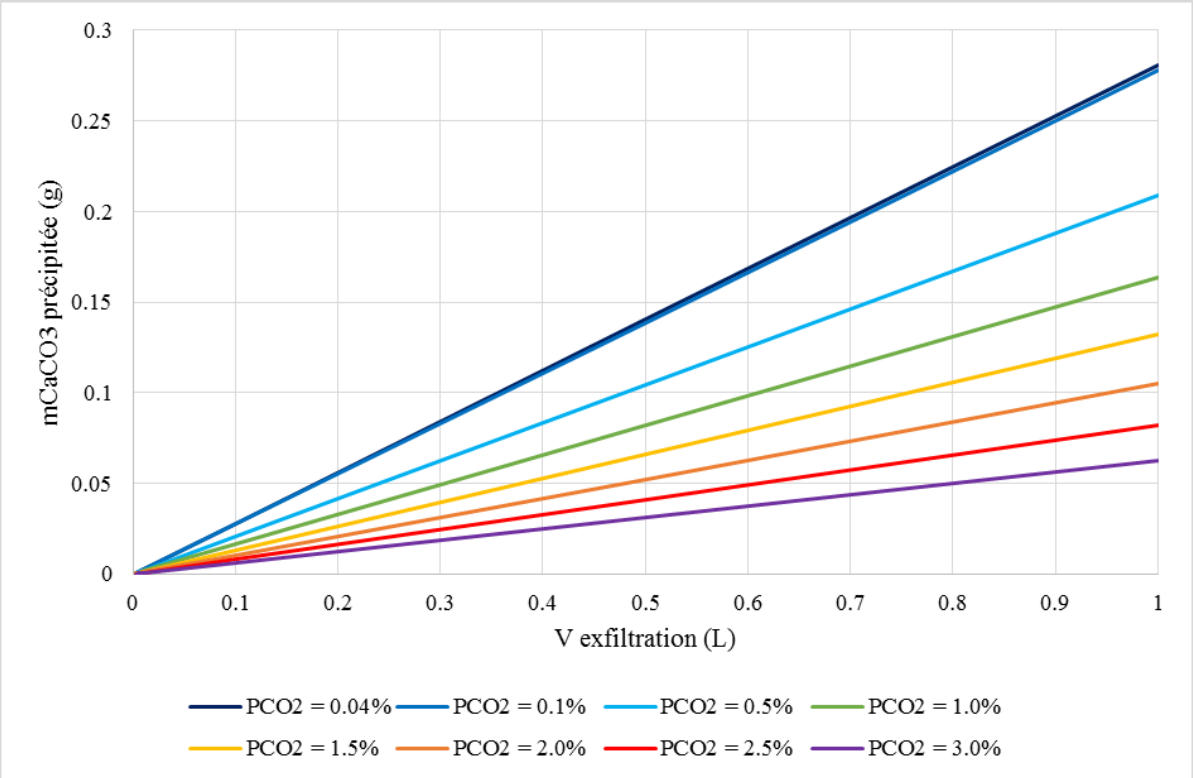


Figure V-33 : Relation entre volume d'eau et masse de calcite précipitée ($mCaCO_3$ dissoute) pour des PCO_2 de l'air de la cavité différentes.

Les différentes courbes montrent des relations de proportionnalité entre volume d'eau considéré et masse de calcite affectée. En effet, une augmentation du volume d'eau d'un facteur 2 entrainera une augmentation d'un facteur 2 de la masse de calcite dissoute ou précipitée. Cette proportionnalité bien qu'attendue, nous permet de valider la pondération de la masse de calcite estimée ($mCaCO_3$ en $g.L^{-1}$) en masse de calcite « vraie » ($mCaCO_3$') pondérée par le volume d'eau de condensation ou d'exfiltration.

V.4.3.2.3 Impact de la PCO_2 de l'air sur les temps de mise à l'équilibre des eaux de condensation et d'exfiltration avec le support calcitique

Pour déterminer quel pas de temps minimal il est nécessaire de respecter pour les futures applications de la méthode et notamment pour estimer l'évolution temporelle de la masse de calcite potentiellement dissoute ou précipitée, il est au préalable important de déterminer quel est le temps maximal de mise à l'équilibre des eaux de condensation et d'exfiltration avec la paroi. Pour cela, le Tableau V-11 présente les temps estimés à l'aide du logiciel PHREEQC pour que l'eau de condensation atteigne l'équilibre physico-chimique avec la paroi pour différents volumes d'eau et PCO_2 de l'air.

Tableau V-11 : Temps estimés par simulation pour la mise à l'équilibre de l'eau de condensation avec l'air et le support calcitique pour différents PCO_2 et volumes d'eau de condensation.

V eau (L/m^2)	**t pour ISc =0 (s)**						
	PCO_2 = 3.0%	**PCO_2 = 2.5%**	**PCO_2 = 2.0%**	**PCO_2 = 1.5%**	**PCO_2 = 1.0%**	**PCO_2 = 0.5%**	**PCO_2 = 0.1 %**
1.00	13050.0	12600.0	12000.0	11250.0	10050.0	8100.0	4800.0
0.50	6525.0	6300.0	6000.0	5625.0	5025.0	4050.0	2400.0
0.10	652.5	630.0	600.0	562.5	502.5	405.0	240.0
0.05	32.6	31.5	30.0	28.1	25.1	20.3	12.0
0.01	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1

Les valeurs montrent comme il était attendu que plus la PCO_2 est importante, plus le temps de mise à l'équilibre est important. De la même façon, plus le volume d'eau et donc l'épaisseur d'eau sur le support est importante, plus le temps pour atteindre ISc = 0 est long. Ce dernier peut atteindre 13050 s (environ 3h30) pour une PCO_2 de l'air de 5% et un volume d'eau de 1L. A l'inverse pour des volumes de 0.01 L et 0.05 L d'eau de condensation, l'équilibre est atteint instantanément. Pour visualiser l'évolution de l'équilibre entre eau et calcite, la Figure V-34 présente l'évolution de l'ISc en fonction du temps pour des PCO_2 de l'air différentes et un volume d'eau d'1L.

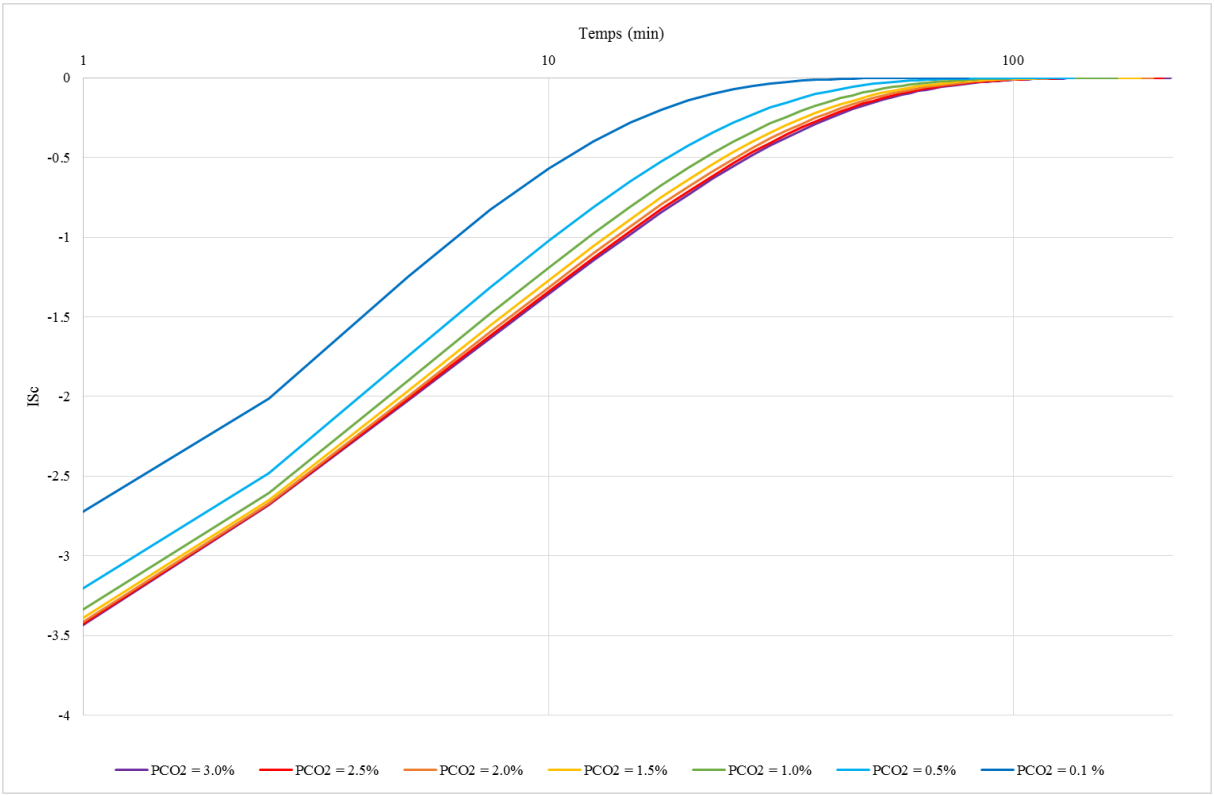


Figure V-34 : Temps de mise à l'équilibre de l'eau de condensation avec l'air et la calcite pour différentes PCO_2 de l'air. Pour ce graphique, un litre par mètre carré de condensation est considéré.

Le Tableau V-12 présente les temps estimés pour que l'eau d'exfiltration (PCO_2sat = 5%) atteigne l'équilibre physico-chimique avec la paroi pour différents volumes d'eau et PCO_2 de l'air.

Tableau V-12 Temps estimés par simulation pour la mise à l'équilibre de l'eau d'exfiltration (PCO_2sat = 5%) avec l'air et le support calcitique pour différents PCO_2 de l'air et volumes d'eau d'exfiltration.

V eau (L/m²)	**t pour ISc =0 (s)**								
	PCO_2 = 5.0%	**PCO_2 = 4.0%**	**PCO_2 = 3.0%**	**PCO_2 = 2.5%**	**PCO_2 = 2.0%**	**PCO_2 = 1.5%**	**PCO_2 = 1.0%**	**PCO_2 = 0.5%**	**PCO_2 = 0.1 %**
1.00	0	4560.0	5160.0	5280.0	5400.0	5280.0	5160.0	4440.0	2760.0
0.50	0	2280.0	2580.0	2640.0	2700.0	2640.0	2580.0	2220.0	1380.0
0.10	0	228.0	258.0	264.0	270.0	264.0	258.0	222.0	138.0
0.05	0	11.4	12.9	13.2	13.5	13.2	12.9	11.1	6.9
0.01	0	0.11	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13	0.11	0.07

Les temps de mise à l'équilibre n'excèdent pas 5400 s (1h30) pour toutes les configurations simulées. Pour une PCO_2 de l'air de 5%, le temps est nul pour signaler qu'aucun changement du signal chimique n'est observé. Les autres configurations montrent quant à elles que quel que soit le volume d'eau considéré, le temps de mise à l'équilibre le plus important est toujours rencontré pour une PCO_2 de l'air de 2%. Ainsi, ce temps n'est pas proportionnel avec la différence entre la PCO_2 de l'air et la PCO_2sat initiale. La Figure V-35 illustre bien cette observation.

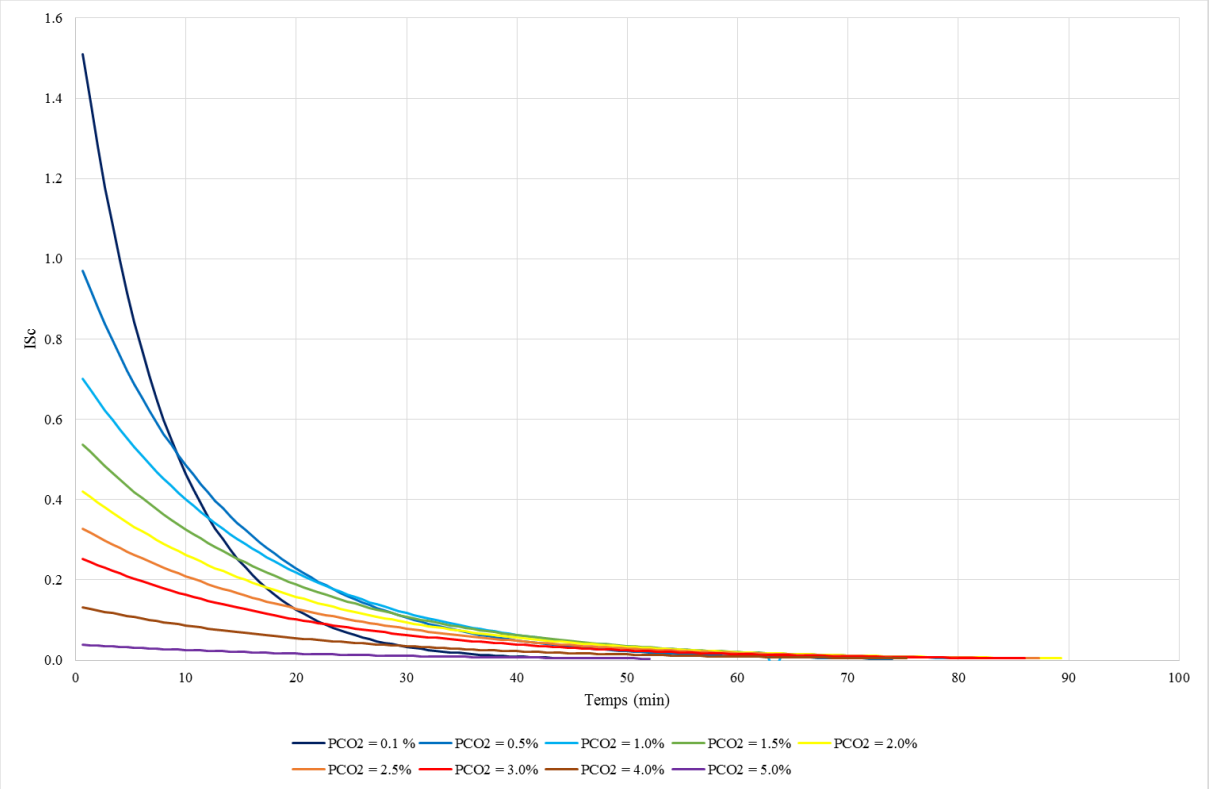


Figure V-35 : Temps de mise à l'équilibre de l'eau d'exfiltration avec l'air et la calcite pour différentes PCO_2 de l'air. Pour ce graphique, un litre par mètre carré d'eau est considéré.

Ainsi que ce soit pour les eaux de condensation ou d'exfiltration, les temps de mise à l'équilibre n'excèdent pas 3h30 pour les différentes configurations considérées. Cependant, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que ces estimations ne représentent que partiellement la réalité pour le processus de dissolution. En effet, le support de simulation constitué de calcite pure permet une mise à l'équilibre plus rapide des eaux que pour une paroi naturelle constituée dans le cas de Lascaux par un calcaire gréseux. Toutefois le pas de temps hebdomadaire utilisé pour la future application de la méthode nous permet de nous affranchir de cette incertitude.

V.4.3.2.4 Le signal géochimique initial de l'eau d'exfiltration

Deux eaux d'exfiltration différentes sont utilisées pour les différentes simulations (PCO_2sat de 3 ou 5 %). Pour évaluer cet impact, la Figure V-36 présente la masse de calcite potentiellement précipitée par ces deux eaux différentes selon la PCO_2 de l'air.

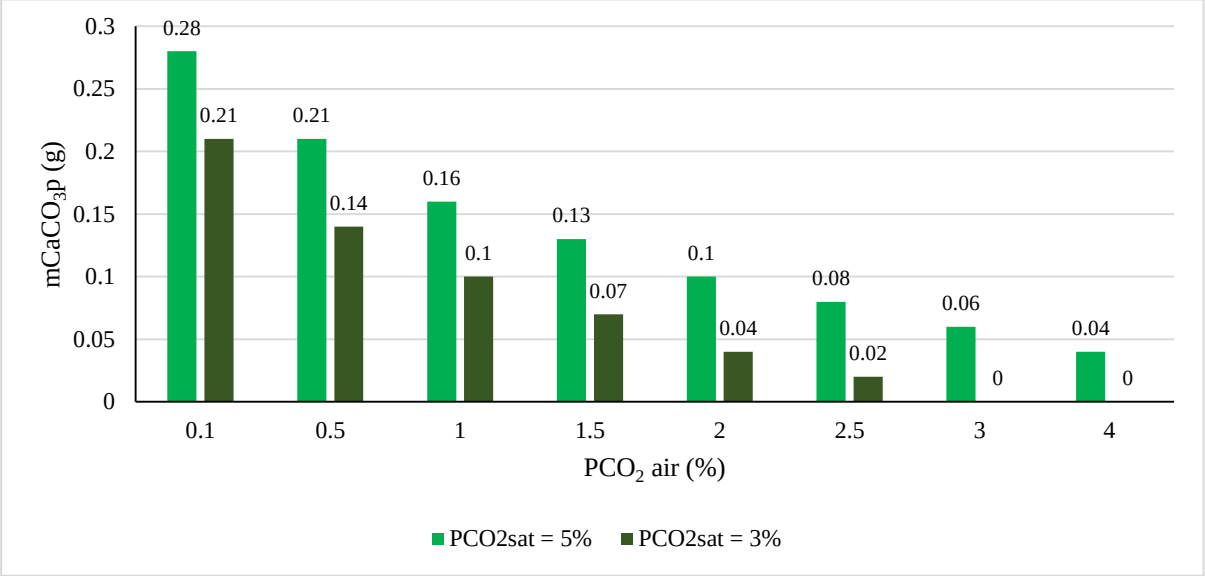


Figure V-36 : Comparaison de la masse de calcite précipitée pour un litre d'eau d'exfiltration pour une PCO_2sat initiale de l'eau de 5% (vert clair) et 3 % (vert foncé).

L'analyse graphique montre que ce paramètre est primordial pour l'estimation de $mCaCO_3p$. En effet, pour toutes les PCO_2 de l'air, $mCaCO_3p$ est supérieure pour l'eau présentant la plus forte PCO_2sat. De plus, pour les PCO_2 de l'air supérieures à 3%, aucune précipitation de calcite n'est possible pour l'eau d'exfiltration ayant une PCO_2sat de 3%. Devant les incertitudes relatives à la chimie des eaux d'exfiltration et l'impact de cette dernière sur les masses de calcite potentiellement précipitée, les deux types d'eau seront utilisés pour l'application à la paroi gauche de la Salle des Taureaux.

V.4.4 Application de la méthodologie à la paroi gauche de la Salle des Taureaux de la cavité de Lascaux

Pour illustrer la méthodologie développée et présentée au cours de cette partie. La paroi gauche de la Salle des Taureaux est choisie pour son intérêt archéologique mais aussi car cette dernière est potentiellement affectée par les eaux de condensation et d'exfiltration. En effet, c'est en ce point de la cavité que les exfiltrations sont les plus importantes. Elle constitue de plus le point de la zone ornée pour lequel la différence entre la température de l'air et de la paroi est la plus importante au cours de l'année. Le potentiel de condensation y est donc le plus élevé.

Cette application est réalisée pour les années 2014 et 2015 afin d'évaluer l'impact de l'extraction de l'air sur les processus calco-carboniques pouvant altérer cette paroi ornée. Nous attirons à nouveau l'attention du lecteur sur le fait que cette méthode ne permet pas dans le cas de la cavité de Lascaux, de proposer un bilan de la masse de calcite potentiellement affectée au cours de l'année. Néanmoins, son application permet à l'évaluation des périodes de l'année au cours desquelles les perturbations du support calcitiques des ornements sont potentiellement les plus fortes ou les plus faibles. Ces informations seront importantes pour la gestion des entrées humaines dans la cavité, tant ces dernières peuvent entrainer un déséquilibre du milieu souterrain par adjonction de chaleur et d'humidité dans l'air de la cavité entrainant potentiellement de la condensation sur les parois les plus froides.

Pour présenter ces résultats, cette partie sera composée de quatre sous-parties avec en premier lieu la présentation des relations numériques liant PCO_2 de l'air et masse de calcite potentiellement affectées, puis l'application de ces relations pour la paroi considérée en contexte de pompage (2014) puis en contexte « naturel » (2015). Pour finir, une dernière section sera consacrée à une discussion sur l'impact du pompage sur l'équilibre des eaux aux parois mais aussi aux perspectives qui peuvent être données pour cette méthode.

V.4.4.1 Détermination des relations liant PCO_2 de l'air et masse de calcite affectée par les processus de dissolution et de précipitation

Pour simplifier la méthode, des relations numériques ont été déterminées entre la PCO_2 de l'air et la masse de calcite affectée (condensation ou exfiltration) pour éviter des simulations systématique par le logiciel PHREEQC. Ces relations retranscrivent de façon numérique la relation chimique complexe entre PCO_2 de l'air et masse de calcite potentiellement dissoute ou précipitée. Pour cela, nous prenons comme hypothèse que les effets de la température sont

faibles du fait de la stabilité de ce paramètre dans la grotte (0,5 ° C de variation au cours de la période d'étude).

Ces relations donnent, à un instant t, une estimation de la masse de carbonate de calcium potentiellement dissoute et déposée aux parois, en tenant compte des valeurs de PCO_2 dans la grotte de Lascaux. Les Figure V-37 et Figure V-38 présentent ces relations respectivement pour les processus de dissolution et de précipitation.

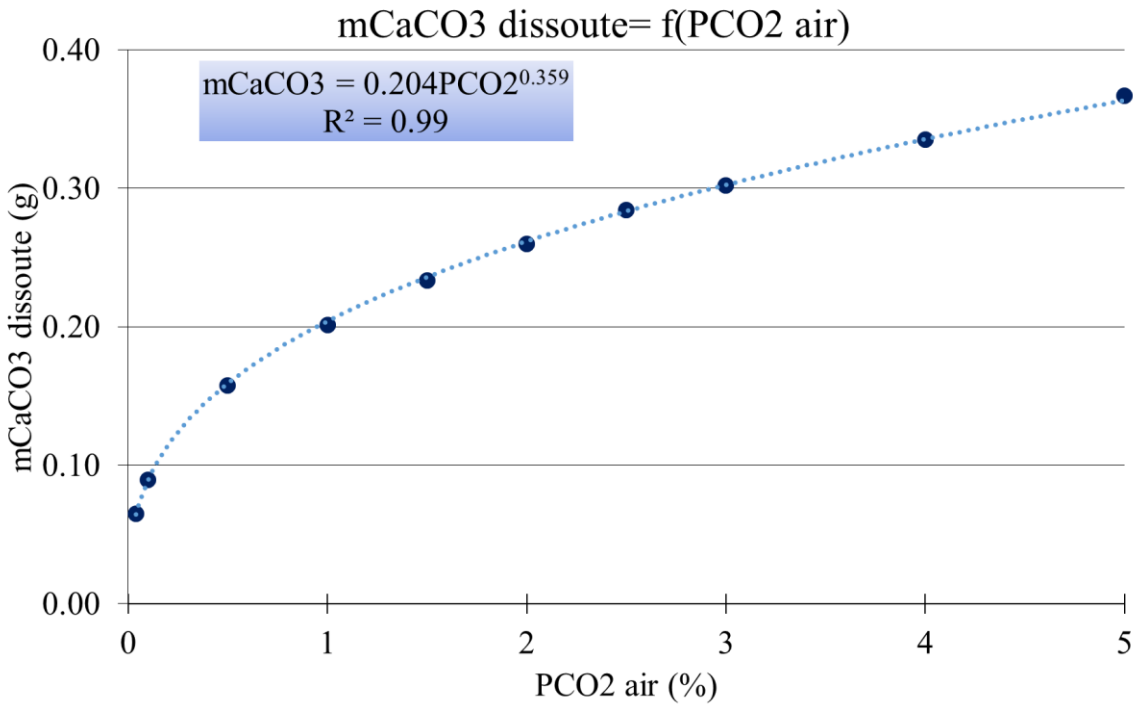


Figure V-37 : Graphique montrant la relation entre PCO_2 de l'air et masse de calcite dissoute pour un litre d'eau de condensation.

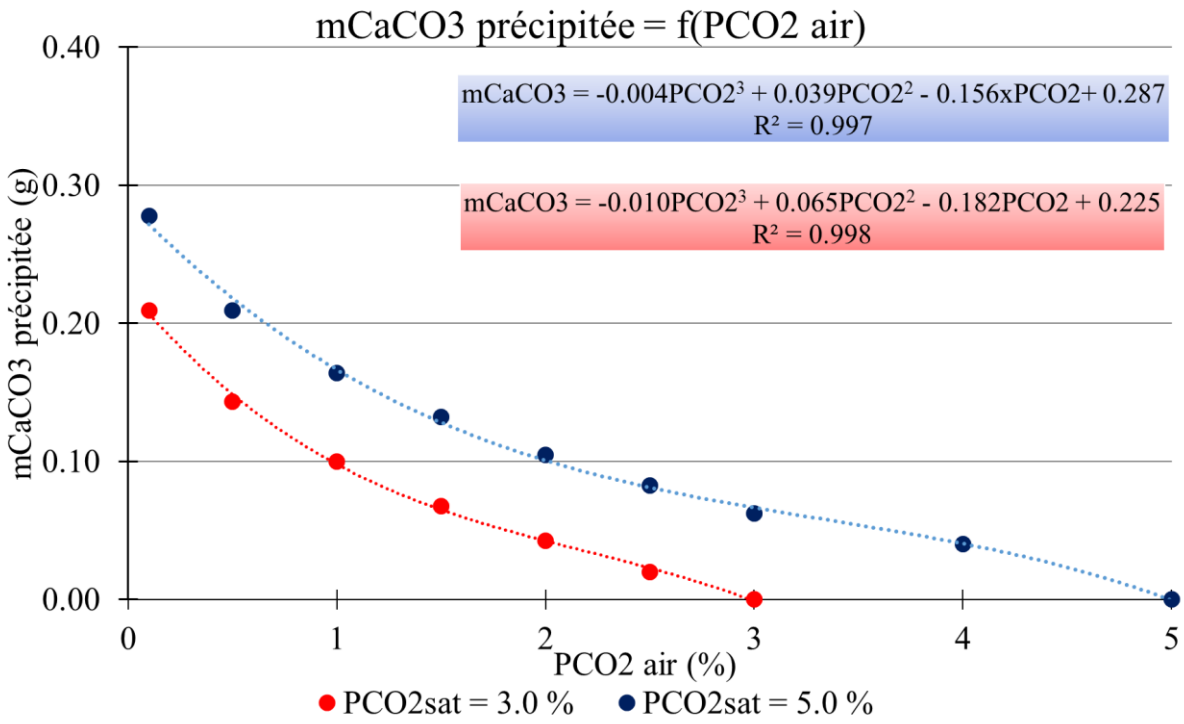


Figure V-38 : Graphique montrant les relations entre PCO_2 de l'air et masse de calcite précipitée pour un litre d'eau d'exfiltration selon le chimisme de cette dernière. En bleu la relation pour une PCO_2sat initiale de 5 %, en rouge pour une PCO_2sat initiale de 3%.

Des relations différentes entre PCO_2 de l'air et masses de carbonate de calcium dissoute ou déposée peuvent être envisagées. Une régression sous forme d'une loi puissance est proposée pour estimer la dissolution de la masse de calcite (équation 41). Deux régressions permettent d'estimer directement le dépôt de carbonate de calcium en ne considérant que la PCO_2 de l'air et la PCO_2sat initiale de l'eau (équations 42 et 43 respectivement pour les eaux de PCO_2sat initiales de 3 et 5%). Les coefficients de détermination sont proches de 0.99 pour chacune des relations. Ces équations de régression sont considérées comme valables uniquement pour les valeurs de PCO_2 de l'air utilisées pour les simulations précédentes (0.04 à 5%).

$$mCaCO3_d = (0.204 * PCO2^{0.359}) \quad (41)$$

$$mCaCO3_p = -0.01 * PCO2^3 + 0.065 * PCO2^2 - 0.182 * PCO2 + 0.225 \quad (42)$$

$$mCaCO3_p = -0.004 * PCO2^3 + 0.039 * PCO2^2 - 0.156 * PCO2 + 0.287 \quad (43)$$

Ces relations seront appliquées en utilisant la PCO_2 de l'air enregistrée toutes les minutes dans la cavité de Lascaux. Pour la condensation, les résultats seront pondérés par le volume d'eau potentiellement condensable sur la paroi déterminé à partir des différences de température entre air et roche.

V.4.4.2 Avec pompage de l'air de la cavité

La première étape consiste à déterminer les volumes d'eau d'exfiltration et de condensation présents à la paroi à un instant t. Le volume d'eau d'exfiltration présent à un instant t sur cette paroi est estimé à partir de la surface maximale de la paroi affectée par cet écoulement au cours de l'année (environ 10 m²), ainsi que de l'épaisseur du film d'eau estimée suite aux observations réalisées dans la cavité (50µm). Ce volume sera considéré comme constant au cours de l'année. Le volume d'eau d'exfiltration considéré pour cet exemple est de 0.5 L. Pour l'estimation du volume d'eau de condensation potentiel, il a été considéré que l'excès d'humidité contenu dans tout le volume d'air de la Salle des Taureaux (400 m^3) allait condenser sur la paroi gauche de la cavité. Le volume d'eau condensable sur la paroi gauche de la Salle des Taureaux calculé à partir de l'équation 3 évolue de 0 à 0.13 L au cours de notre période d'étude.

Pour estimer la masse de calcite potentiellement dissoute ou précipitée à la paroi, les relations déterminées précédemment sont utilisées (équations 41, 42 et 43) pour estimer une valeur hebdomadaire de la masse de calcite potentiellement dissoute ou précipitée en prenant en compte la moyenne hebdomadaire de la PCO_2 de l'air mesurée mais aussi les volumes d'eau de condensation et d'exfiltration potentiellement présents à la paroi. Les résultats obtenus sont présentés en Figure V-39. Sur ce graphique sont reportés l'évolution des masses de calcite potentiellement déposée (a) par l'écoulement du joint selon deux scénarios ($PCO2_{sat}$ de 3% et 5 %), ou dissoute par l'eau de condensation (b) à la paroi. Parallèlement sont présentées les périodes d'écoulement du joint ainsi que la période de condensation potentielle à la paroi gauche de la Salle des Taureaux obtenue à partir de la différence de température entre la roche et l'air (c). L'évolution des valeurs de PCO_2 utilisées pour la simulation est aussi présentée (d). Il est important de noter que ce graphique ne donne en aucun cas un bilan de la masse de calcite affectée à la paroi en fonction du temps, mais la masse de calcite potentiellement dissoute ou précipitée dans les conditions de PCO_2 et de température constante. Par exemple, pour une PCO_2 de 0.27% et un volume de condensation de 0.013 L, le potentiel de dissolution de la calcite par l'eau de condensation va atteindre 1.15 mg pour toute la paroi gauche de la Salle des Taureaux.

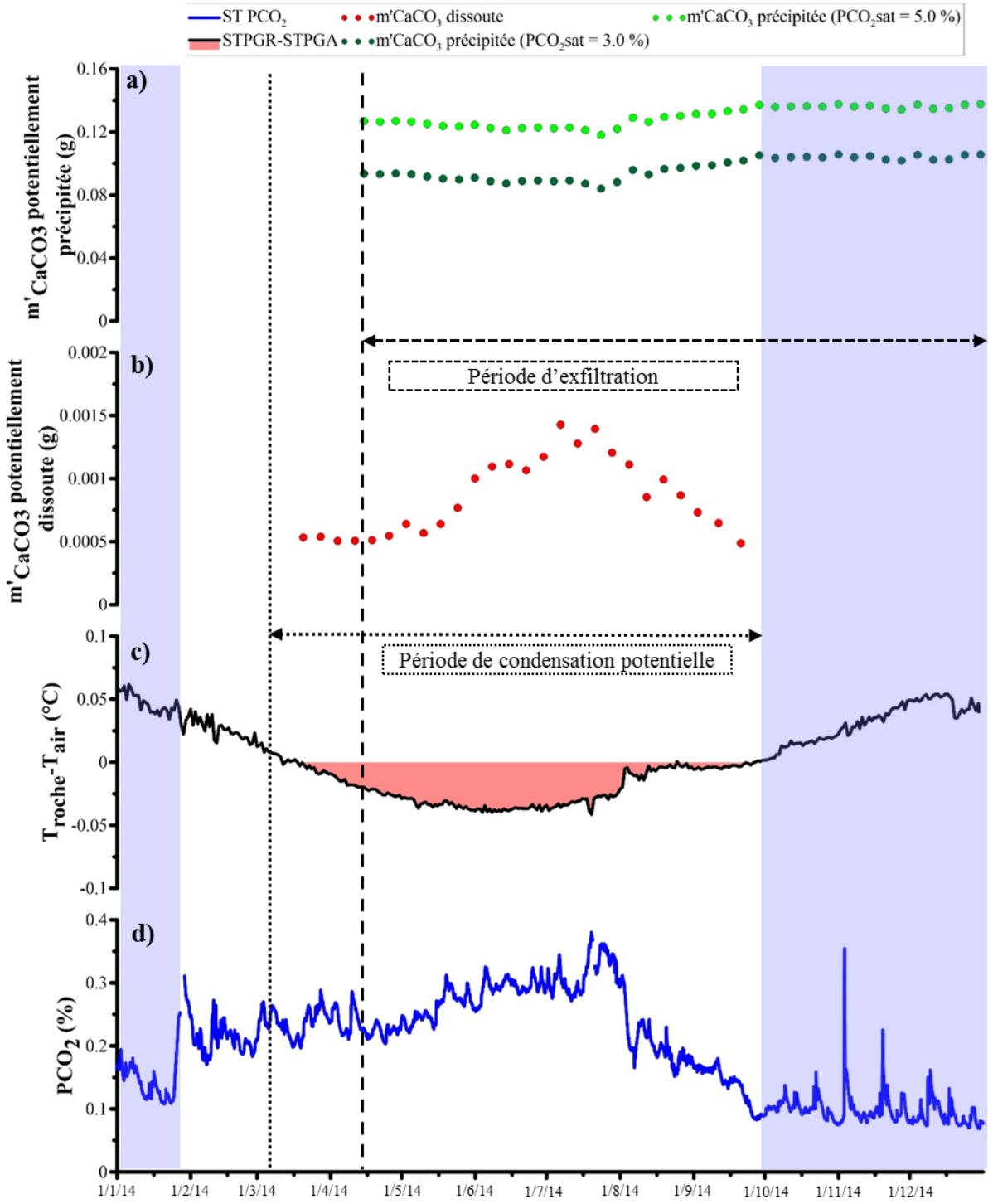


Figure V-39 : Evolution de la masse de calcite potentiellement affectées par les processus de précipitation pour des eaux d'exfiltration ayant une PCO_2sat initiale de 3 % (vert foncé) et 5% (vert clair) (a) et de dissolution (b) pour l'année 2014. Parallèlement sont présentées l'évolution des différences de température entre roche et air (c), le remplissage rouge signale la période potentielle de condensation ainsi que l'évolution de la PCO_2 mesurée dans l'air de la Salle des Taureaux. La période d'exfiltration au joint stratigraphique est aussi présentée tout comme celle du régime de stratification des masses d'air (grisé).

La période de suintements aux joints stratigraphiques de la paroi gauche de la Salle des Taureaux s'étend de la fin de la mi-Avril 2014 jusqu'à la fin du mois de Décembre 2014. Les estimations des masses de calcite potentiellement précipitées varient de 80.05 à 101.6 mg pour une eau ayant une PCO_{2sat} initiale de 3.0% et de 111.9 à 135.6 mg pour une eau ayant une

PCO_{2sat} initiale de 5.0 %. La variabilité de ces potentiels de précipitation est expliquée par la variabilité saisonnière de la PCO_2 de l'air. La répartition temporelle des PCO_2 de l'air de la Salle des Taureaux et donc les régimes aérologiques qui la contrôlent jouent donc un rôle important dans le mécanisme de précipitation de calcite sur les supports ornés. Ce phénomène d'encroutement pourrait donc s'avérer problématique sur le long terme pour la conservation des peintures de cette paroi.

La période de condensation potentielle à la paroi gauche de la Salle des Taureaux débute à la mi-Mars 2014 et s'achève à la fin du mois de Septembre 2014 lors de la mise en route de la machinerie de conditionnement de l'air. Au cours de cette période potentielle de condensation, la masse de calcite potentiellement dissoute varie de 0.49 à 1.51 mg avec les valeurs les plus faibles rencontrées au mois d'avril 2014 et les valeurs les plus élevées au cours du mois de Juillet 2014 (PCO_2 de l'air et volume d'eau condensable importants). La masse de calcite affectée est donc moins importante dans le cas de la corrosion que dans le cas de la précipitation avec un facteur 100 en faveur du processus de précipitation. Néanmoins, ce phénomène de corrosion pourrait s'avérer non négligeable pour la conservation de la cavité de Lascaux si l'eau de condensation était renouvelée à la paroi. Cependant, aucun suintement d'eau de condensation n'a été observé sur la paroi gauche de la Salle des Taureaux même lorsque le risque de condensation était important. Il paraît aussi cohérent de penser que l'eau condensée à la surface de la paroi va s'équilibrer avec la température de l'air ce qui tend à montrer que la condensation ne va pas se renouveler à l'exception de perturbations importantes provoquées par exemple par l'entrée humaine dans la cavité. De plus, il est important de noter que la période d'écoulement au joint de la paroi gauche de la Salle des Taureaux coïncide avec la période potentielle de condensation. Nous pouvons donc penser que la dissolution de la calcite par l'eau de condensation sera faible à nulle sur la surface de paroi affectée par les phénomènes de condensation et d'exfiltration. En effet, dès son dépôt sur le support, l'eau de condensation sera immédiatement tamponnée par l'eau d'exfiltration dans les zones où cette dernière est présente.

V.4.4.3 Sans pompage de l'air de la cavité

La même stratégie précédemment utilisée est appliquée aux données recueillies dans la cavité de Février 2015 (15 jours après l'arrêt du pompage de l'air) à Février 2016. Les résultats sont présentés en Figure V-40.

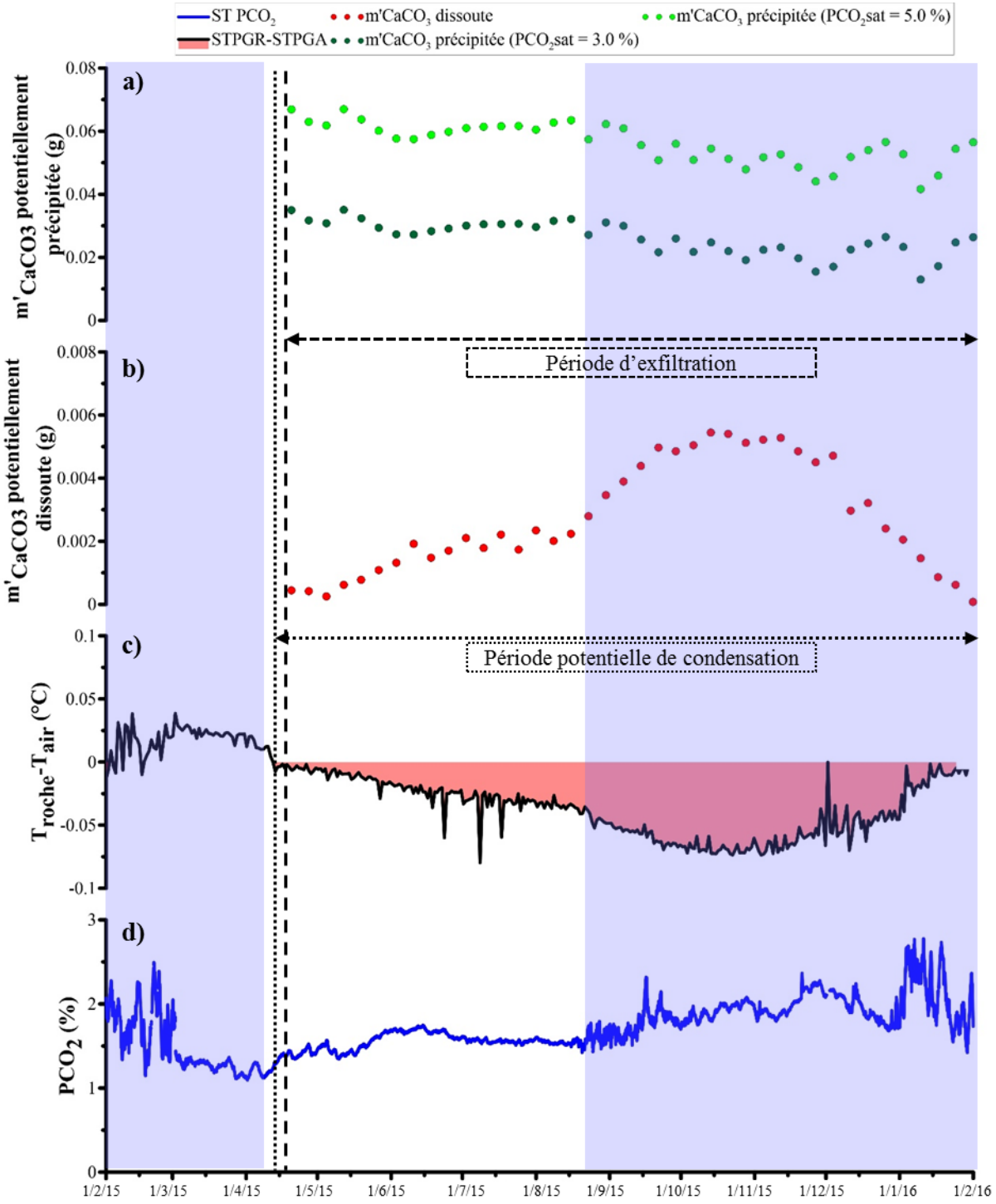


Figure V-40 : Evolution de la masse de calcite potentiellement affectées par les processus de précipitation pour des eaux d'exfiltration ayant une PCO_2sat initiale de 3 % (vert foncé) et 5% (vert clair) (a) et de dissolution (b) de Février 2015 à Février 2016. Parallèlement sont présentées l'évolution des différences de température entre roche et air (c), le remplissage rouge signale la période potentielle de condensation ainsi que l'évolution de la PCO_2 mesurée dans l'air de la Salle des Taureaux. La période d'exfiltration au joint stratigraphique est aussi présentée tout comme celle du régime aérologique de stratification des masses d'air (grisé).

La période de suintements aux joints stratigraphiques de la paroi gauche de la Salle des Taureaux s'étend de la fin du mois d'avril 2015 jusqu'au mois de Février 2016. Les estimations des masses de calcite potentiellement précipitées varient de 13.03 à 35.64 mg pour une eau ayant une PCO_{2sat} initiale de 3.0% et de 41.75 à 67.70 mg pour une eau ayant une PCO_{2sat}

initiale de 5.0 %. Pour ces deux eaux, le potentiel de précipitation le plus important est identifié au cours du printemps (plus faible PCO_2 de l'air).

La période de condensation potentielle à la paroi gauche de la Salle des Taureaux débute lors de la mise en place des convections (Avril 2015). En effet, la mise en place des convections entre la Salle des Taureaux et les zones plus profondes et plus chaudes a pour conséquence de réchauffer la température de l'air de la Salle des Taureaux. La paroi gauche n'est alors plus en équilibre thermique avec l'air ce qui pour conséquence de permettre une possible condensation sur ce support. La condensation est ensuite possible sur ce support jusqu'au mois de Février 2016 avec un risque accru au cours de la seconde période de stratification de l'air de la cavité (Août 2015 à Décembre 2015). Le gradient de température entre l'air et la roche de la paroi gauche de la Salle des taureaux est donc contraint en partie par les régimes aérologiques de la cavité. Il est important de signaler qu'au cours de cette année, la machinerie de conditionnement de l'air n'a pas été lancée. Au cours de cette période potentielle de condensation, la masse de calcite potentiellement dissoute varie de 0.16 à 5.61 mg avec les valeurs les plus faibles rencontrées au mois d'avril 2015 et les valeurs les plus élevées au cours de l'hiver 2015-2016. La masse de calcite affectée est donc moins importante dans le cas de la corrosion que dans le cas de la précipitation.

L'aérologie de la cavité a donc une influence importante lorsque l'on considère les risques de corrosion et d'encroutement des parois d'une cavité karstique comme celle de Lascaux. La dynamique aérologique est à l'origine de la répartition des teneurs en CO_2 dans une cavité, mais aussi du déséquilibre entre la température de l'air et la température de la roche qui peut engendrer la condensation et donc la corrosion de la paroi. Elle va aussi avoir une influence sur la remise à l'équilibre du système naturel suite à une perturbation ainsi que sur les conséquences potentielles de cette dernière. Par exemple, l'entrée humaine dans la cavité engendre un déséquilibre thermique (apport de chaleur) et hydrique (apport de vapeur d'eau) qui peut provoquer de la condensation sur la paroi. Ce déséquilibre sera réparti dans le volume affecté par les mouvements d'air en phase de convection (moins risqué) quand il sera concentré dans un volume plus faible au cours des phases de stratification (plus risqué) comme l'ont montré Lacanette et Malaurent (2010). L'aérologie de la cavité doit donc être prise en compte par le gestionnaire pour anticiper et éviter les désordres potentiels causés par une entrée humaine.

V.4.5 Discussion sur l'impact du pompage et les perspectives d'amélioration de la méthode

La comparaison des potentiels de corrosion et d'encroutement des eaux de condensation et d'exfiltration à la paroi gauche de la Salle des Taureaux en contexte de pompage et en contexte naturel apporte des informations supplémentaires sur l'impact de ce dispositif sur la conservation des parois. Ainsi, le potentiel de dissolution maximal est plus important sans pompage (5.5 mg) qu'en contexte de pompage (1.5 mg) du fait de l'abaissement des teneurs en CO_2 dans la cavité produit par le pompage. De plus, la période potentielle de condensation est plus longue que celle de l'année 2014 (8.5 mois contre 7 mois). Cette variabilité n'est cependant pas imputable à coup sûr à l'arrêt du pompage tant les températures externes, paramètre impacté par les variations interannuelles, conditionnent les températures mesurées dans la cavité. La machinerie de conditionnement de l'air n'ayant pas été mise en route au cours de l'année 2015, il n'est pas incohérent de penser que cette absence de production d'air froid ait impacté la durée de la période potentielle de condensation. Le potentiel maximal de précipitation est deux fois plus important en contexte de pompage qu'en contexte naturel du fait du déséquilibre important entre PCO_2 de l'air et PCO_2sat des eaux d'exfiltrations. Ce processus semble donc représenter un risque non négligeable pour les parois ornées lorsque les PCO_2 sont abaissées dans la cavité. Ainsi, les deux mécanismes potentiellement à l'origine de l'altération des parois ornées voient leur importance évoluer de façon opposés selon le fonctionnement ou l'arrêt du pompage. De cette affirmation découle la question suivante : Comment choisir la configuration optimale pour la cavité ?

Du point de vue des masses de calcite affectées respectivement par les deux processus, l'encroutement potentiel est bien plus conséquent que le processus de dissolution. De plus, il est important de considérer que la condensation aux parois de la Salle des Taureaux peut être réduite par l'action de la machinerie de conditionnement de l'air, ce qui n'est pas le cas des eaux d'exfiltration. Le potentiel de dissolution peut donc être contrôlé artificiellement ce qui n'est pas le cas du potentiel d'encroutement. Du point de vue de ces arguments, il est possible d'affirmer que le pompage de l'air de la cavité peut avoir un impact négatif important et difficilement contrôlable du point de vue de l'altération des parois ornées par les eaux d'exfiltration. A contrario, il semble possible de restreindre le risque de corrosion des parois par les eaux de condensation en contexte « naturel » et ce, en agissant sur le volume d'eau potentiellement condensable aux parois de la cavité. Cependant, il serait souhaitable de pérenniser les suivis de l'état des parois et notamment vis-à-vis des phénomènes de dissolution

mais aussi de précipitation, tant ce dernier reste important aux parois de la cavité malgré la diminution de l'écart entre les PCO_2 de l'air et la PCO_2sat des eaux d'exfiltration.

Quoi qu'il en soit, la méthodologie développée a montré sa facilité de mise en œuvre. Néanmoins cette méthodologie pourrait être améliorée sur de nombreux points. En premier lieu, il semble important de préciser le signal hydrogéochimique mais aussi le débit des eaux d'exfiltration aux parois de la cavité. En effet, l'importance de ces paramètres a été démontrée au cours de l'application de cette méthode. Cette identification semble pour le moment difficile étant donné les technologies actuelles. De la même façon, pour diminuer les incertitudes il est important de faire évoluer le support de simulation vers une phase solide plus à même de représenter le calcaire gréseux composant la paroi. Parallèlement, il serait intéressant de pouvoir mieux apprécier la localisation des zones de condensation pour discriminer les zones potentiellement impactées par le processus de dissolution et de les comparer avec les perturbations du support calcique observées depuis la découverte dans la cavité. Enfin, cette méthodologie a été appliquée sans considérer les interventions humaines dans la cavité. Il serait donc intéressant de développer la prise en compte de l'impact humain sur les potentiels de dissolution à l'échelle journalière. En effet, il a été observé lors de certaines interventions importantes du point de vue du temps de présence dans la cavité, des augmentations de température de l'air de l'ordre de 0.05 °C. L'augmentation du volume d'eau potentiellement condensable suite à ces entrées humaines pourrait donc avoir pour conséquences de doubler le potentiel de dissolution des eaux de condensation en contextes de pompage ou « naturel ». Cette démarche pourrait permettre au gestionnaire d'évaluer le risque encouru par les parois ornées suite à ces interventions humaines tout en prenant en compte l'aérologie de la Grotte de Lascaux qui peut conditionner fortement l'impact des entrées humaines sur l'altération des parois.

VI. Conclusion générale

La Grotte de Lascaux est une des cavités ornées les plus célèbres dans le monde. Sa découverte en 1940 suivie de son classement au patrimoine mondial de l'UNESCO en 1979 a marqué un tournant dans la vision des contemporains sur l'héritage archéologique inestimable que l'on se doit de conserver. Cette petite cavité de subsurface renferme en effet les plus belles peintures rupestres polychromes de l'art pariétal préhistorique, datées de -17 000 ans. L'accent mis sur sa conservation après diverses crises bio-physico-chimiques a conduit à de profondes modifications de son environnement géomorphologique mais aussi de son aérologie. En effet, la mise en place de SAS de protection confère à cette cavité de subsurface un isolement vis-à-vis de l'atmosphère extérieur qui a pour conséquences des teneurs en CO_2 importantes tout au long de l'année dans certaines zones de la cavité. L'installation d'un dispositif d'extraction de l'air afin d'abaisser les teneurs en CO_2 de l'air de la Grotte dès 1965 influence les échanges entre cavité et atmosphère. La compréhension de l'impact de ce forçage anthropique a donc fait partie intégrante de nos diverses réflexions.

La première partie de ces travaux de thèse a été de déterminer la dynamique du CO_2 dans l'épikarst sus-jacent à la cavité afin de comprendre les mécanismes responsables des fortes teneurs en CO_2 relevées dans la cavité mais aussi dans certaines zones de l'épikarst par Vouvé (1968) ou encore (Lopez, 2009). A cette fin, nos interprétations se sont basées sur les nombreuses séries temporelles de teneur en CO_2 de l'air de l'épikarst (et des formations altéritiques associées) mais aussi des paramètres hydroclimatiques mesurées in-situ sur le site de la parcelle expérimentale. En parallèle, les teneurs en CO_2 dans les différents sols de la cavité sont mesurées ainsi que les flux de CO_2 émanant du continuum sol-épikarst. L'analyse de l'évolution de ces différents paramètres nous a permis de montrer un enrichissement en CO_2 de l'épikarst avec la profondeur résultant d'une production importante de CO_2 dans les calcisols leptiques sus-jacents. La dynamique de ce gaz est alors fortement impactée dans l'épikarst superficiel par la teneur en eau des sols sus-jacents. Des périodes d'accumulation et de vidange conditionnées par l'évolution de la saturation en eau des horizons superficiels qui restreint les échanges avec l'atmosphère du début de l'hiver jusqu'au milieu de l'été et l'assèchement des sols suivis de l'augmentation des flux de CO_2 de l'épikarst vers l'atmosphère. Ce mécanisme d'accumulation souligne l'influence de la pédo-géologie et notamment le rôle prépondérant de la couverture pédologique sur la dynamique du CO_2 dans l'épikarst superficiel. Les transferts vers la zone profonde de l'épikarst sont assurés par le transfert advectif suite à la mise en place de thermoconvections entre la surface et la « gazosphère » comme l'avait dénommée Vouvé. Un schéma conceptuel de la dynamique du CO_2 est avancé à l'issue de cette étude.

Suite à cette première étude, nous disposons de nombreuses séries de données pouvant servir de base à une modélisation de la dynamique du CO_2 dans les milieux fissurés tels que l'épikarst de la Grotte de Lascaux. Certaines interrogations subsistent toutefois notamment quant au signal isotopique en ^{13}C du CO_2 contenu dans l'épikarst. En effet, nous ne disposons pas d'un suivi régulier de ce signal ce qui ne nous permet pas d'analyser sa variabilité de ce signal souvent utilisée pour l'étude de l'aérologie des cavités. A cette fin, il serait intéressant de suivre en continu ces variations tout au long de l'année dans les différents forages de la parcelle expérimentale.

La seconde partie de ces travaux a été consacrée à la compréhension de la dynamique du CO_2 dans la cavité avec comme objectif connexe la détermination de l'impact du pompage de l'air sur ce paramètre et l'aérologie de la cavité. A cette fin, les nombreuses séries temporelles de PCO_2 et des paramètres microclimatiques (températures de l'air et de la roche, pression atmosphérique interne) enregistrées toutes les minutes depuis 2012 dans les différentes zones de la cavité ont été analysées et interprétées. En parallèle, l'évolution du signal isotopique du CO_2 de l'air des différentes salles de la cavité a été analysée avec comme objectif la discrimination des différentes origines de l'air et donc du CO_2 présent dans l'atmosphère de la cavité (atmosphère extérieur, sol, épikarst superficiel ou profond, massif environnant). L'arrêt du pompage décidé en accord avec les membres du Conseil Scientifique de la Grotte de Lascaux et effectif dès le début d'année 2015 a permis l'enregistrement de ces différents paramètres durant deux périodes suffisamment longues avec et sans pompage de l'air. L'étude comparative des deux configurations différentes montre un impact important du pompage sur les PCO_2 de l'air de la cavité qui croissent significativement dès l'arrêt de ce dispositif dans les zones superficielles et potentiellement sur les températures mesurées dans la cavité (augmentation suite à l'arrêt de l'extraction). Ce constat accompagné des calculs de coefficient de participation de CO_2 atmosphérique dans la cavité à partir des données isotopiques montrent des entrées d'air plus importantes en période de pompage de l'air. Ce pompage avait donc pour conséquences de faire entrer de façon artificielle de l'air extérieur dans la Grotte de Lascaux et ce principalement dans les zones ornées superficielles telles que la Salle des Taureaux, le Diverticule Axial, le Passage ou encore l'Abside.

Néanmoins, malgré cette composante anthropique qui impacte les teneurs en CO_2 et les températures, la dynamique du CO_2 est similaire pour les deux périodes dans les différentes zones de la cavité. Ainsi, des zones d'arrivée de flux de CO_2 importants sont discriminées dans

la cavité avec deux principales localisés dans les zones profondes que sont l'éboulis du Bas de la Grande Diaclase et le système Galerie Mondmilch-Cabinet des Félins. L'étude des signaux isotopiques en période d'arrêt du pompage nous permet d'affirmer que ces deux sources de CO_2 isotopiquement différentes se répandent dans la totalité de la cavité sous l'effet des variations de la pression barométrique. Cependant, des mécanismes aérologiques démontrés aussi bien en période de pompage que sans pompage sont majoritairement responsables de la variabilité des PCO_2 dans la Grotte de Lascaux. Ces mécanismes aérologiques internes sont la résultante de la variabilité saisonnière du gradient thermique selon la profondeur qui s'établit dans les zones superficielles (Salle des Taureaux, Diverticule Axial, Passage et Abside) mais aussi dans la Grande Diaclase. Les variations de ce gradient sont influencées par la conduction des ondes thermiques externes qui atteignent les différentes profondeurs de la cavité avec un déphasage temporel proportionnel à cette profondeur. Ainsi, lorsque le gradient est négatif avec la profondeur, les PCO_2 sont différenciées et croissent avec la profondeur du fait de la stratification de l'atmosphère (fin d'été jusqu'au début du printemps). A contrario, lorsque ce gradient est inversé, des thermoconvections se mettent en place et homogénéisent les différentes masses d'air avec pour conséquence une homogénéisation des teneurs en CO_2 dans les différentes salles affectées. Ainsi, la dynamique du CO_2 dans la cavité est impactée par la dynamique du CO_2 siégeant dans l'épikarst et dans la zone de transmission et par des mécanismes aérologiques internes contrôlés par la variabilité des températures. Un modèle conceptuel global de la dynamique du CO_2 dans la cavité est produit en fin de cette partie.

Quoi qu'il en soit, l'utilisation des PCO_2 et des températures comme traceurs des écoulements d'air dans les cavités karstiques mériterait d'être appliquée à d'autres cavités similaires ou très différentes d'un point de vue aérodynamique afin de mieux apprécier les mécanismes internes qui peuvent donc fortement impacter la dynamique spéléogénique dans les cavités de la zone d'hétérothermie. En effet, notre étude montre clairement la forte sensibilité du CO_2 en tant que traceur des écoulements d'air dans les cavités karstiques.

L'utilisation du signal isotopique du CO_2 nous amène toutefois à apporter un avis négatif sur l'application de l'approche de Keeling (1958) dans le contexte de cavités karstiques. Il en est de même pour les coefficients de participation de l'air atmosphérique dans la totalité de l'air de la cavité. En effet, nous avons été dans l'obligation comme Peyraube et al. (2016) le signalent, de considérer dans nos équations de mélange à deux pôles (atmosphère et membre léger attribué généralement au sol) une valeur du signal isotopique du membre léger différente

en condition de pompage (-26.7 ‰) et en contexte naturel (-24.5 ‰). Il n'est pas imaginable que le membre léger change de signature isotopique sous l'effet du pompage. Cependant, les connaissances acquises quant à la dynamique du CO_2 nous permettent de penser que le marquage isotopique de CO_2 de l'air de la cavité est la résultante d'un mélange mettant en jeu au moins trois pôles différents : atmosphère, sol ou épikarst superficiel et un troisième membre léger que nous nommerons « épikarst profond ou massif ». Ainsi, la méthode communément utilisée demande à être adaptée pour retranscrire plus correctement la réalité ces différents échanges. Pour cela, un troisième paramètre (en plus de la PCO_2 et du signal isotopique en ^{13}C) doit être considéré dans un modèle de mélange à trois membres. Celui-ci pourrait être le Radon (222Rn) qui permettrait par sa courte période de demi-vie (3.823 jours) de discriminer l'air provenant de l'épikarst profond et celui venant des horizons superficiels. En parallèle, il serait très intéressant de suivre en continu le signal isotopique en ^{13}C du CO_2 dans différentes zones de la Grotte de Lascaux comme cela est effectué par exemple dans la Grotte d'Altamira en Espagne (Garcia-Anton et al., 2014). Les séries temporelles de PCO_2, ^{222}Rn et $\delta^{13}C_{CO2}$ permettront alors d'évaluer en continu les apports de CO_2 provenant de l'atmosphère, de l'épikarst superficiel et du massif subsuperficiel (épikarst subsuperficiel et zone de transmission superficielle).

La troisième partie de notre étude a porté sur l'étude des conditions d'écoulement dans l'épikarst de la Grotte de Lascaux à l'aide de l'analyse des séries temporelles continues des paramètres physico-chimiques ainsi que du COD en tant que traceurs naturels des écoulements. En parallèle, l'évolution du signal hydrogéochimique d'un écoulement soutenu par une nappe perchée dans la zone non saturée du karst de la colline de Lascaux est étudiée afin de mettre en évidence les conditions d'écoulement dans ce compartiment karstique. Enfin, la caractérisation des équilibres calco-carboniques des eaux de l'émergence épikarstique de Lascaux est effectuée avec comme corollaire une interprétation des facteurs affectant ces paramètres importants pour la conservation des parois ornées. Ainsi, l'utilisation du suivi hydrogéochimique en continu a permis une analyse fine des conditions d'écoulement siégeant dans l'épikarst. Des processus de dilution par des eaux d'infiltration rapide, de piston d'eau à long temps de séjour ou encore la mobilisation de réserves auparavant isolées du système étudié lors des périodes de fortes saturation en eau de l'épikarst. De même, il a été démontré que la réserve en eau temporaire se constituant durant les périodes de recharge et qui soutient le débit de base du système d'écoulement en l'absence de sollicitation pluvieuse, joue un rôle important dans le comportement hydrodynamique de l'épikarst et par conséquent sur la chimie des eaux arrivant

dans la Grotte de Lascaux. Ainsi, lorsque cette réserve est limitée, les infiltrations rapides marquent fortement la chimie des eaux à l'exutoire. A contrario, lorsque cette réserve est importante, les infiltrations rapides sont tamponnées et ont donc un impact moins important sur le signal hydrogéochimique à l'exutoire. De plus, la croissance de de la saturation de l'épikarst en période de précipitations soutenues conditionnent l'importance de la zone contribuant à l'écoulement à l'exutoire par l'établissement de nouvelles connections hydrauliques. Ce constat pourrait expliquer les difficultés rencontrées par Lopez (2009) dans la restitution des débits à l'émergence à l'aide d'une modélisation réservoir classique (surface d'alimentation fixe). Différemment, il vient appuyer l'architecture proposée par Minvielle (2015) qui reproduit l'influence de la teneur en eau de l'épikarst à l'aide d'un réservoir différent. L'étude de l'exutoire de la nappe perchée de la Haute Fageotte a permis de démontrer les apports d'eaux d'origine épikarstique en période de hautes eaux. Néanmoins, l'absence de mesure en continu du débit, des paramètres physico-chimiques ainsi que de ka fluorescence de l'eau ne permettent pas une interprétation détaillée des conditions d'écoulement dans la zone non saturée du karst de la colline de Lascaux. A cette fin, il serait intéressant d'installer un dispositif de suivi en continu du débit mais aussi de ces traceurs naturels des conditions d'écoulement.

L'étude des équilibres calco-carboniques des eaux à l'émergence épikarstique permet de mettre en évidence des eaux sursaturées à saturées vis-à-vis de la calcite comportant des PCO_2sat variables. Nous nous sommes alors attachés à caractériser les mécanismes responsables de la variabilité de ces équilibres. La comparaison avec l'évolution des teneurs en CO_2 dans l'épikarst montre une excellente corrélation avec la PCO_2sat de l'émergence épikarstique au cours du cycle déficitaire 2014-2015, confirmant la méthode développée par Peyraube et al. (2012). La PCO_2sat de la réserve épikarstique, principale composante de l'écoulement au cours de ce cycle, croit au cours du cycle tout comme la conductivité de l'eau à l'émergence sous l'effet de l'augmentation saisonnière de la PCO_2 dans l'épikarst. Ce constat pose alors la question de la cohérence de considérer comme cela est communément admis, que la conductivité de l'eau retranscrit le temps de séjour de l'eau dans le système. En effet, dans le système épikarstique, cette augmentation de la minéralisation n'est pas due à un temps de contact plus important entre calcite et eau, mais plutôt à un changement des conditions d'équilibre entre air de l'épikarst et eau de la réserve épikarstique conduisant à un gazage suivi de dissolution de calcite. Néanmoins, cette corrélation est beaucoup moins claire pour le cycle excédentaire 2015-2016, ce qui nous permet de montrer que les conditions d'écoulement dans

l'épikarst conditionnent les équilibres calco-carboniques des eaux en mettant en jeu des eaux d'origines différentes et donc de signatures chimiques différentes à l'exutoire.

Enfin, les informations acquises au cours des différentes études de ces travaux de thèse nous permettent de développer une méthode d'évaluation de l'évolution des impacts potentiels des eaux d'exfiltration et de condensation aux parois à partir de la PCO_2 de l'air. Cette démarche de simulation (PHREEQC) est basée sur l'utilisation des données recueillies en continu grâce au dispositif de surveillance des paramètres microclimatiques et des PCO_2 dans la cavité de Lascaux. Elle permet *in-fine* de déterminer une masse de calcite potentiellement dissoute par les eaux de condensation ou précipitée par les eaux d'exfiltration aux parois de la cavité dans des conditions de PCO_2 et de températures de l'air et de la roche variables. Son application à une paroi de la cavité de Lascaux nous permet d'analyser l'impact de l'évolution des PCO_2 et donc de l'aérologie sur les processus d'altération des parois ornées. La comparaison des résultats obtenus pour des simulations en période de pompage et sans pompage apporte des éléments de réflexions quant à l'intérêt d'un tel dispositif pour la conservation des parois ornées de la cavité de Lascaux. En effet, en période de pompage, le potentiel de dissolution de calcite par les eaux de condensation est moindre qu'en l'absence du pompage du fait de l'impact de ce dernier sur les PCO_2 de l'air. A contrario, en l'absence de pompage, le potentiel de précipitation de calcite est inférieur à celui rencontré en période de pompage du fait du différentiel moindre entre PCO_2 de l'air et PCO_2sat de l'eau. Ainsi, d'un côté le pompage a un impact positif vis-à-vis de la conservation des parois en diminuant le potentiel de dissolution et un impact négatif en augmentant le potentiel de précipitation de calcite. Néanmoins, s'il nous était demandé de choisir entre pompage ou contexte naturel, nous choisirions sous réserve de pérenniser les suivis de l'état des parois, de ne pas redémarrer ce dernier. En effet, les risques relatifs à la dissolution de calcite peuvent être limités ou même annulés selon les périodes de l'année par la mise en route de la machinerie de conditionnement de l'air. Ainsi, en agissant sur le facteur de risque « eau de condensation », le potentiel de dissolution est réduit. A l'inverse, le risque de précipitation de calcite par les eaux d'exfiltrations ne peut être maîtrisé dans l'état actuel des connaissances théoriques et techniques.

Quoi qu'il en soit la méthode développée présente un potentiel d'évolution conséquent. En premier lieu, il serait intéressant de considérer un support calcitique analogue à celui des parois de la cavité de Lascaux et non de la calcite pure. De plus, le volume des différents types d'eau présents aux parois ainsi que leur caractéristiques physico-chimiques initiales devront

être précisés, le principal écueil technique résidant dans la mesure de l'épaisseur du film d'eau en paroi ainsi que dans le prélèvement des eaux d'exfiltration avant leur mise à l'équilibre avec l'atmosphère de la cavité.

Enfin, cette méthode pourrait être enrichie afin d'aider à la gestion des interventions humaines dans la cavité en produisant des évaluations objectives des risques de dissolution et de précipitation à un instant t basées sur les paramètres microclimatiques et PCO_2 enregistrés en continu dans la Grotte de Lascaux. Pour cela, cette démarche pourrait reprendre les bases des méthodes employées dans divers domaines pour la gestion des risques et notamment celles utilisées pour la détermination de la vulnérabilité de la ressource en eau karstique telle que COP+K (Vias et al, 2006) ou encore PAPRIKA (Kavouri et al., 2011).

Références bibliographiques

A

Ågren, G. I., & Bosatta, E. (1996). Quality: a bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. *Oikos*, 522-528.

AIEA, (2008), Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique, collection cours de formation n°32, coordonné par W.G. MOOK et traduit de l'anglais par Y.TRAVI, Vienne, Autriche, ISSN 1018–5518, 613p.

Albéric, P., & Lepiller, M. (1998). Oxydation de la matière organique dans un système hydrologique karstique alimenté par des pertes fluviales (Loiret, France) oxidation of organic matter in a karstic hydrologic unit supplied through stream sinks (Loiret, france). *Water Research*, *32*(7), 2051-2064.

Albéric, P., Viollier, E., Jézéquel, D., Grosbois, C., & Michard, G. (2000). Interactions between trace elements and dissolved organic matter in the stagnant anoxic deep layer of a meromictic lake. *Limnology & Oceanography*, *45*, 1088-1096.

Andreo, B., Carrasco, F., Bakalowicz, M., Mudry, J., & Vadillo, I. (2002). Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca–Mijas unit (Málaga, southern Spain). *Environmental Geology*, 43(1), 108–119. https://doi.org/10.1007/s00254-002-0614-z

Appelo, C. A. J., & Parkhurst, D. L. (1998). Enhancements to the geochemical model PHREEQC-1D transport and reaction kinetics. *Water Rock Interaction, 9*, 873-876.

Appelo C.A.J., & Postma D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution, *edition A.A. balkema, 2nd edition*, ISBN : 04-1536-421-3, 649p.

Atkinson T.C. (1977). Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *Journal of Hydrology, 35(1-2)*, p111-p123.

Aon, M. A., & Colaneri, A. C. (2001). II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology, 18*(3), p255-270.

Aujoulat, N., Cleyet-Merle, J.-J., Gaussen, J., Tisnerat, N., & Valladas, H. (1998). Approche chronologique de quelques sites ornés paléolithiques du Périgord par datation carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur. *Paléo*, 10, 319-323.

Aujoulat, N. (2004). Lascaux - Le geste, l'espace et le temps (éd. Collection « Art rupestres »). France: Seuil.

B

Bakalowicz M., & C. Jusserand, (1986). Etude de l'infiltration en milieu karstique par les méthodes géochimiques et isotopiques, cas de la grotte de Niaux (Ariège, France), Hommage à André BURGER, *bulletin du centre d'hydrogéologi*e, Université de Neuchâtel, N°7, pp 264-283, 20p.

Bakalowicz M. (1995). La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthode d'étude. Structure et fonctionnement. *Hydrogéologie, 4*, p3-p21.

Baldini, J. U., Baldini, L. M., McDermott, F., & Clipson, N. (2006). Carbon dioxide sources, sinks, and spatial variability in shallow temperate zone caves: evidence from Ballynamintra Cave, Ireland. *Journal of Cave and Karst Studies*, *68*(1), 4-11.

Baldini, J. U., McDermott, F., Hoffmann, D. L., Richards, D. A., & Clipson, N. (2008). Very high-frequency and seasonal cave atmosphere PCO_2 variability: implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, *272*(1), 118-129.

Baldock J.A. & Skjemstad J.O., (2000). Role of soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Org. Geochem.*, p697-p710.

Bathellier, C., Badeck, F. W., Couzi, P., Harscoët, S., Mauve, C., & Ghashghaie, J. (2008). Divergence in δ13C of dark respired CO_2 and bulk organic matter occurs during the transition between heterotrophy and autotrophy in Phaseolus vulgaris plants. *New Phytologist*, *177*(2), 406-418.

Batiot, C. (2002). Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral la connaissance hydrogéologique des systèmes. Site expérimental de Vaucluse, Jura, Larzac, Région Nord-Montpelliéraine, Nerja (Espagne) (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, p 247.

Batiot, C., Liñán, C., Andreo, B., Emblanch, C., Carrasco, F., & Blavoux, B. (2003). Use of Total Organic Carbon (TOC) as tracer of diffuse infiltration in a dolomitic karstic system: The Nerja Cave (Andalusia, southern Spain). *Geophysical research letters*, *30*(22).

Batiot-Guilhe, C., Seidel, J.-L., Jourde, H., Hébrard, O., & Bailly-Comte, V., (2007). Seasonal variations of CO_2 and 222 Rn in a Mediterranean sinkhole-spring (Causse d'Aumelas, SE France*). International Journal of Speleology* 36, 5.

Benavente, J., Vadillo, I., Carrasco, F., Soler, A., Liñán, C., & Moral, F., (2010). Air Carbon Dioxide Contents in the Vadose Zone of a Mediterranean Karst. Vadose Zone Journal 9, 126. doi:10.2136/vzj2009.0027

Billings, S. A., & Richter, D. D. (2006). Changes in stable isotopic signatures of soil nitrogen and carbon during 40 years of forest development. *Oecologia*, *148*(2), 325-333.

Bignot G., (1972), Recherches stratigraphiques sur les calcaires du Crétacé supérieur et de l'Eocène d'Istrie et des régions voisines. Essai de révision du Liburnien., Thèse, Université de Paris,

Blagodatskaya, E., Blagodatsky, S., Dorodnikov, M., & Kuzyakov, Y. (2010). Elevated atmospheric CO_2 increases microbial growth rates in soil: results of three CO_2 enrichment experiments. *Global Change Biology*, *16*(2), 836-848.

Blair, N., Leu, A., Muñoz, E., Olsen, J.., Kwong, E., & Des Marais, D. (1985). Carbon isotopic fractionation in heterotrophic microbial metabolism. *Applied and Environmental Microbiology*, *50*(4), 996-1001.

Bourges, F., Genthon, P., Mangin, A., & D'Hulst, D., (2006). Microclimates of l'Aven d'Orgnac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). *International Journal of Climatology* 26, 1651–1670. doi:10.1002/joc.1327

Bowling, D. R., Pataki, D. E., & Randerson, J. T. (2008). Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO_2 fluxes. *New Phytologist*, *178*(1), 24-40.

Breecker, D. O., Payne, A. E., Quade, J., Banner, J. L., Ball, C. E., Meyer, K. W., & Cowan, B. D. (2012). The sources and sinks of CO_2 in caves under mixed woodland and grassland vegetation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *96*, 230-246.

Breuil, H. (1941). Une Altamira française : la caverne de Lascaux à Montignac (Dordogne). *Compte-rendu de l'Académie des Inscriptions et Belles Lettres*, *85-5* , 347-376.

Breuil, H. (1952). Quatre cents siècles d'art pariétal. Les cavernes ornées de l'âge de Renne. Montignac: Centre d'Etude et de Documentation Préhistorique.

Bruxelles L. et Camus H., (2014). Grotte de Lascaux. Formes et formations anciennes de surface et subsurface (Montignac, Dordogne). *Rapport d'étude, Inrap, Protée et Ceneau,* 99p.

C

Carrasco, F., I. Vadillo, C. Liñan, B. Andreo, & J.J. Durán. (2002). Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja Cave (Málaga, Spain). *Acta Carsologica* 31:105–122.

Celle-Jeanton, H., Emblanch, C., Mudry, J., & Charmoille, A. (2003). Contribution of time tracers (Mg2+, TOC, δ13CTDIC, NO3−) to understand the role of the unsaturated zone: A case study—Karst aquifers in the Doubs valley, eastern France. *Geophysical research letters*, *30*(6).

Cerling, T. E., Solomon, D. K., Quade, J. A. Y., & Bowman, J. R. (1991). On the isotopic composition of carbon in soil carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *55*(11), 3403-3405.

Charlier, J. B., Bertrand, C., & Mudry, J. (2012). Conceptual hydrogeological model of flow and transport of dissolved organic carbon in a small Jura karst system. *Journal of hydrology*, *460*, 52-64.

Charmoille A., (2005). Traçage hydrochimiques des interactions hydrauliques et mécaniques entre les volumes perméables et peu perméables au sein des aquifères fracturés carbonatés, Thèse, Université de Franche Comté, 320p.

Cigna, A. A. (2002). Modern trend in cave monitoring. *Acta carsologica*, *31*(1), 35-54.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC press.

Cohen, G., Loisy, C., Laveuf, C., Le Roux, O., Delaplace, P., Magnier, C., ... & Cerepi, A. (2013). The CO_2-Vadose project: experimental study and modelling of CO_2 induced leakage and tracers associated in the carbonate vadose zone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *14*, 128-140.

Cras, A. (2005, January). Etude et modélisation de la dynamique de fonctionnement hydrologique des bassins versants torrentiels marneux, apport du traçage naturel: application aux bassins versants de recherche et d'expérimentation (BVRE) de Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France. Avignon.

Craven, S.A., (1996).Carbon Dioxide variations in Cango Cave, South Africa. *Cave and Karst Science*, 23(3), 89-92.

Crowther, J. (1983). Carbon dioxide concentrations in some tropical karst soils, West Malaysia. *Catena*, *10*(1-2), 27-39.

Crow, S. E., Sulzman, E. W., Rugh, W. D., Bowden, R. D., & Lajtha, K. (2006). Isotopic analysis of respired CO 2 during decomposition of separated soil organic matter pools. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(11), 3279-3291.

Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Benavente, D., Serrano-Ortiz, P., Kowalski, A.S., & Sanchez-Moral, S., (2011). Short-term CO_2(g) exchange between a shallow karstic cavity and the external atmosphere during summer: Role of the surface soil layer. *Atmospheric Environment* 45, 1418–1427. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.12.023

D

Davidson, G. R. (1995). The stable isotopic composition and measurement of carbon in soil CO_2. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *59*(12), 2485-2489.

Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, *440*(7081), 165-173.

Davis, J. A. (1982). Adsorption of natural dissolved organic matter at the oxide/water interface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *46*(11), 2381-2393.

De Freitas, C. R., Littlejohn, R. N., Clarkson, T. S., & Kristament, I. S. (1982). Cave climate: assessment of airflow and ventilation. *Journal of Climatology*, *2*(4), 383-397.

De Freitas, C.R. & Banbury, K., (1999). Build up and diffusion of carbon dioxide in cave air in relation to visitor numbers at the Glowworm Cave, New Zealand. Cave Management in Australasia XIII. Proceedings of the Thirteenth Australasian Conference on Cave and Karst Management, Mount Gambier, South Australia. *Australasian Cave and Karst Management Association*, Carlton South, Victoria, 84-89.

De Freitas, C. R., & Schmekal, A. (2003). Condensation as a microclimate process: measurement, numerical simulation and prediction in the Glowworm Cave, New Zealand. *International Journal of Climatology*, *23*(5), 557-575.

De Marsily, G. (1986). Quantitative hydrogeology. Paris School of Mines, Fontainebleau.

Deines, P., Langmuir, D., & Harmon, R. S. (1974). Stable carbon isotope ratios and the existence of a gas phase in the evolution of carbonate ground waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *38*(7), 1147-1164.

Delleur J.W., (1999). The handbook of groundwater engineering, Boca Raton, Fla. , CRC Press ; Heidelberg , Springer - cop.1999, ISBN : 978-0-849-32698-1, pp 18.18-18.19, 992p.

Denis, A. (2005). Identification of functional relationships between atmospheric pressure and CO_2 in the cave of Lascaux using the concept of entropy of curves. *Geophysical Research Letters*, *32*(5). https://doi.org/10.1029/2004GL022226

Doctor D., Lojen S., & Horvat M., (2000). A stable isotope investigation of the classical karst aquifer: evaluating karst groundwater components for water quality preservation, *acta carsologica*, vol. 5, pp 79-92, 14p.

Dörr H., & Münich K.O., (1986). Annual variations of the 14C content of soil CO2, Radiocarbon, vol.28, pp 338-345, 8p.

Dragovich, D., & Grose, J. (1990). Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management. *Geoforum*, *21*(1), 111-120.

Dreybrodt, W., Eisenlohr, L., Madry, B., & Ringer, S. (1997). Precipitation kinetics of calcite in the system CaCO3+ H2O+ C02: The conversion to CO2 by the slow process H++ HCO 3−→ CO2+ H2O as a rate limiting step. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *61*(18), 3897-3904.

Dreybrodt, W., & Scholz, D., (2011). Climatic dependence of stable carbon and oxygen isotope signals recorded in speleothems: From soil water to speleothem calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 734–752. doi:10.1016/j.gca.2010.11.002.

Duranceau, M., Ghashghaie, J., Badeck, F., Deleens, E., & Cornic, G. (1999). $\delta^{13}C$ of CO_2 respired in the dark in relation to δ13C of leaf carbohydrates in Phaseolus vulgaris L. under progressive drought. *Plant, Cell & Environment*, *22*(5), 515-523.

E

Ek C., (1981). Mesures du CO_2 dans l'air des grottes: comparaison Québec-Belgique. In: International Union of Speleology (Ed.), 8th International Congress of Speleology, Bowling Green (Kentucky), *International Union of Speleology*: 672-673.

Ek, C. & Gewelt, M., (1985). Carbon dioxide in cave atmospheres. New results in Belgium and comparison with some other countries. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 173-187.

Ekblad, A., Boström, B., Holm, A., & Comstedt, D. (2005). Forest soil respiration rate and $\delta^{13}C$ is regulated by recent above ground weather conditions. *Oecologia*, *143*(1), 136-142.

Emblanch, C. (1997). Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques. Etude en région méditerranéenne de montagne sur le bassin expérimental de la Fontaine de Vaucluse, Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, p219.

Emblanch, C., Blavoux, B., Puig, J. M., & Couren, M. (1998). Le marquage de la zone non saturée du karst à l'aide du carbone 13. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, *326*(5), 327-332.

Emblanch, C., Zuppi, G. M., Mudry, J., Blavoux, B., & Batiot, C. (2003). Carbon 13 of TDIC to quantify the role of the unsaturated zone: the example of the Vaucluse karst systems (Southeastern France). *Journal of hydrology*, *279*(1), 262-274.

Emrich, K., Ehhalt, D. H., & Vogel, J. C. (1970). Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. *Earth and Planetary Science Letters*, *8*(5), 363-371.

Epron, D., Ngao, J., Dannoura, M., Bakker, M. R., Zeller, B., Bazot, S., & Barthes, L. (2011). Seasonal variations of belowground carbon transfer assessed by in situ 13 CO 2 pulse labelling of trees. *Biogeosciences*, *8*(5), 1153-1168.

F

Faimon, J., Troppová, D., Baldík, V., & Novotný, R. (2012). Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *International Journal of climatology*, *32*(4), 599-623.

Fang, C., & Moncrieff, J. B. (2001). The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, *33*(2), 155-165.

Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R., & Hubick, K. T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual review of plant biology*, *40*(1), 503-537.

Fernández, P. L., Gutierrez, I., Quindos, L. S., Soto, J., & Villar, E. (1986). Natural ventilation of the paintings room in the Altamira cave.

Fernandez-Cortes, A., Sanchez-Moral, S., Cuezva, S., Cañaveras, J.C., Abella, R., (2009). Annual and transient signatures of gas exchange and transport in the Castañar de Ibor cave (Spain*). International Journal of Speleology* 38, 6.

Fernandez-Cortes, A., Cuezva, S., Garcia-Anton, E., Alvarez-Gallego, M., Pla, C., Benavente, D., & Sanchez-Moral, S. (2015). Changes in the storage and sink of carbon dioxide in subsurface atmospheres controlled by climate-driven processes: the case of the Ojo Guareña karst system. *Environmental Earth Sciences*, *74*(12), 7715-7730.

Ferchal C., (2003). Modélisation des écoulements et des transferts de masse et de chaleur dans la grotte de Lascaux, thèse, université de Bordeaux I, 133p.

Fontaine S., Mariotti A. & Abbadie L., (2003). The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biol. Biochem., 35*, p837-p843.

Ford D., Williams P., (2007). Karst hydrogeology and geomorphology, edition Wiley, 7th edition, ISBN : 978-0-470-84997-2, 562p.

Friedman, I., & O'Neil, J. R. (1977). Data of geochemistry: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest (Vol. 440). *US Government Printing Office*.

Frisia, S., Fairchild, I. J., Fohlmeister, J., Miorandi, R., Spötl, C., & Borsato, A. (2011). Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *75*(2), 380-400.

G

Garcia-Anton, E., Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Benavente, D., & Sanchez-Moral, S., (2014). Main drivers of diffusive and advective processes of CO_2 gas exchange between a shallow vadose zone and the atmosphere. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 21, 113–129. doi:10.1016/j.ijggc.2013.12.006

Garcia-Anton, E., Cuezva, S., Jurado, V., Porca, E., Miller, A. Z., Fernandez-Cortes, A., & Sanchez-Moral, S. (2014). Combining stable isotope (δ13C) of trace gases and aerobiological data to monitor the entry and dispersion of microorganisms in caves. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(1), 473-484.

Genty, D., Blamart, D., Ghaleb, B., Plagnes, V., Causse, C., Bakalowicz, M., & Bourges, F. (2006). Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African δ 13 C stalagmite profiles—comparison with Chinese and South Hemisphere stalagmites. *Quaternary Science Reviews*, *25*(17), 2118-2142.

Ghashghaie, J., Duranceau, M., Badeck, F. W., Cornic, G., Adeline, M. T., & Deleens, E. (2001). $\delta^{13}C$ of CO_2 respired in the dark in relation to $\delta^{13}C$ of leaf metabolites: comparison between Nicotiana sylvestris and Helianthus annuus under drought. *Plant, Cell & Environment*, *24*(5), 505-515.

Gillikin, D. P., & Bouillon, S. (2007). Determination of $\delta^{18}O$ of water and $\delta^{13}C$ of dissolved inorganic carbon using a simple modification of an elemental analyser-isotope ratio mass spectrometer: an evaluation. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, *21*(8), 1475-1478.

Gonfiantini, R., & Zuppi, G. M. (2003). Carbon isotope exchange rate of DIC in karst groundwater. *Chemical Geology*, *197*(1), 319-336.

Gunn J., (1981). Limestone solution rates and process in the waitomo district, New Zealand, *Earth surface process and landforms*, vol. 6, pp 427-445, 19p.

H

Hakl, J., Csige, I., Hunyadi, I., Várhegyi, A., & Géczy, G. (1996). Radon transport in fractured porous media—experimental study in caves. *Environment International*, *22*, 433-437.

Heatherton, T. F., Kozlowski, L. T., Frecker, R. C., & Fagerstrom, K. O. (1991). The Fagerström test for nicotine dependence: a revision of the Fagerstrom Tolerance Questionnaire. *British journal of addiction*, *86*(9), 1119-1127.

Hope, D., Billett, M. F., & Cresser, M. S. (1997). Exports of organic carbon in two river systems in NE Scotland. *Journal of Hydrology*, *193*(1), 61-82.

Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S., & Sanz-Rubio E., (1998). Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact and microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo cave, northern Spain). *Environmental Geology*, 33, 231-242.

Huang P.-M., Wang M.-K. & Chiu C.-Y., (2005). Soil mineral – organic matter – microbe interactions: impacts on biogeochemical processes and biodiversity in soils. *Pedobiologia, 49,* p609-p635.

J, K,

James, J.M., (1977). Carbon dioxide in cave atmosphere. *Transaction of British Cave Research Association*, 4, 417-429.

Jassal, R. S., Black, T. A., Drewitt, G. B., Novak, M. D., Gaumont-Guay, D., & Nesic, Z. (2004). A model of the production and transport of CO_2 in soil: predicting soil CO_2 concentrations and CO_2 efflux from a forest floor. *Agricultural and Forest Meteorology*, *124*(3), 219-236.

Jupin H., (1996). Le cycle du carbone. Hachette Education, *Collection Fondamentaux*, numéro 68, 160p.

Kaufmann, G., & Dreybrodt, W. (2007). Calcite dissolution kinetics in the system CaCO 3–H 2 O–CO 2 at high undersaturation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *71*(6), 1398-1410.

Kätterer, T., Reichstein, M., Andrén, O., & Lomander, A. (1998). Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and fertility of soils*, *27*(3), 258-262.

Kavouri, K., Plagnes, V., Tremoulet, J., Dörfliger, N., Rejiba, F., & Marchet, P. (2011). PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability—application to the Ouysse karst system (southwest France). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 339-353.

Keeling, C. D. (1958). The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et cosmochimica acta*, *13*(4), 322-334.

Klimchouk A.B., (2000). The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W. (EDS.) Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers. Huntsville, *AL: National Speleological Society of America:* 91-99.

Koudina, N., Garcia, R. G., Thovert, J. F., & Adler, P. M. (1998). Permeability of three-dimensional fracture networks. *Physical Review E*, *57*(4), 4466.

Kowalczk, A.J., Froelich, P.N., (2010). Cave air ventilation and CO_2 outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe? *Earth and Planetary Science Letters* 289, 209–219. doi:10.1016/j.epsl.2009.11.010

Kowalski, A.S., Serrano-Ortiz, P., Janssens, I.A., Sanchez-Moral, S., Cuezva, S., Domingo, F., Were, A., Alados-Arboledas, L., (2008). Can flux tower research neglect geochemical CO_2 exchange ? *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1045–1054.

Kowalski, A. S., & Sánchez-Cañete, E. P. (2010). A new definition of the virtual temperature, valid for the atmosphere and the CO_2-rich air of the vadose zone. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(8), 1692-1695.

Kuzyakov, Y. (2006). Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, *38*(3), 425-448.

L

Lambert, W. J., & Aharon, P. (2011). Controls on dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}C$ in cave waters from DeSoto Caverns: implications for speleothem $\delta^{13}C$ assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *75*(3), 753-768.

Langelier W.F., (1936). The analytical control of anti-corrosion water treatment, *Journal of American waterworks association*, vol. 28, pp 1500-1521, 22p.

Lastennet R., (1994), Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques, thèse, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 239p.
Lastennet, R., & Mudry, J. (1997). Role of karstification and rainfall in the behavior of a heterogeneous karst system. *Environmental Geology*, *32*(2), 114–123.

Latimer, R. N. C. & Risk, D. A (2016). An inversion approach for determining distribution of production and temperature sensitivity of soil respiration. *Biogeosciences* **13,** 2111–2122 (2016).

Leroi-Gourhan, A. (1965). Préhistoire de l'art occidental. (éd. 1st). Paris: Mazenot.

Leroi-Gourhan, A., & Allain, A. (1979). Lascaux inconnu, supplément à Gallia préhistoire n°XII. Editions du CNRS.

Leroi-Gourhan, A., & Evin, J. (1979). Les datations de Lascaux. Dans Lascaux inconnu, supplément à Gallia Préhistoire n°XII, pp. 75-80.

Liang F., Song L. & Wei X., (2000). The influences of cave tourism on CO_2 and temperature in Baiyun Cave, Hebei, China. *International Journal of Speleology*, 29 B (1/4): 77-87.

Lin, G., Ehleringer, J. R., Rygiewicz, P., Johnson, M. G., & Tingey, D. T. (1999). Elevated CO_2 and temperature impacts on different components of soil CO_2 efflux in Douglas-fir terracosms. *Global Change Biology*, *5*(2), 157-168.

Liñán, C., Vadillo, I., & Carrasco, F., (2008). Carbon dioxide concentration in air within the Nerja Cave (Malaga, Andalusia, Spain). *International Journal of Speleology* 37, 2.

Linglois-Dussert, N. (2003). Suivi interannuel et modélisation de la composition chimique des eaux d'écoulement en relation avec les occupations du sol: cas du bassin versant du Cousin (Morvan),Thèse de doctorat, Université de Dijon.

Lismonde, B. (2002). Climatologie du monde souterrain. Tome 1: Vent des Ténèbres, p265.

Lismonde, B. (2002). Climatologie du monde souterrain. Tome 2: Aérologie des systèmes karstiques, 361.

Liu Z., Li Q., Sun H., & Wang J., (2007). Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical springs in subtropical karst areas of SW China : Soil CO_2 and dilution effects, *Journal of Hydrology*, vol. 337, pp 207-223, 17p.

Lopez B., (2009). Les processus de transfert d'eau et de dioxyde de carbone dans l'épikarst, thèse, université de Bordeaux I, 372p.

Loÿe-Pilot, M. D. (1985). Les variations des teneurs en carbone organique (dissous et particulaire) d'un petit torrent méditerranéen montagnard (Corse) Verh. *Internat. Verein. Limnol*, *22*, 2087-2093.

Luetscher, M., & Jeannin, P. Y. (2004). Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. *Terra Nova*, *16*(6), 344-350.

Luo Y. & Zhou X., (2006). Soil respiration and the environment. *Amsterdam, The Netherlands; Boston, MA, USA: Elsevier Academic Press.*

M

Malaurent, P., Brunet, J., Lacanette, D., & Caltagirone, J. P. (2005). Apport de la modélisation numérique à la compréhension de l'état des parois de grottes préhistoriques. Premiers résultats à lascaux. *Bulletin de la Société préhistorique Ariège-Pyrénées, 60*, 53-59.

Mandić, M., Mihevc, A., Leis, A., & Bronić, I. K. (2013). Concentration and stable carbon isotopic composition of CO2 in cave air of Postojnska jama, Slovenia. *International Journal of Speleology*, *42*(3), 279-289.

Mangin A., (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse de Doctorat, Université de Dijon, pp 47-58, 12p.

Mangin A, Bourges F, & D'Hulst D., (1999). Painted caves conservation: a stability problem in a natural system (the example of the prehistoric cave of Gargas, French Pyrenees). CR Acad. Sci. Paris. 328: 295-301

Mariotti, A. (1991). Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cahiers Orstom, série Pédologie*, *26*(4), 299-313.

Mattey, D. P., Fairchild, I. J., Atkinson, T. C., Latin, J. P., Ainsworth, M., & Durell, R. (2010). Seasonal microclimate control of calcite fabrics, stable isotopes and trace elements in modern speleothem from St Michaels Cave, Gibraltar. *Geological Society, London, Special Publications*, *336*(1), 323-344.

Meyer, J. L., Edwards, R. T., & Risley, R. (1987). Bacterial growth on dissolved organic carbon from a blackwater river. *Microbial Ecology*, *13*(1), 13-29.

Milanolo, S., & Gabrovšek, F. (2009). Analysis of carbon dioxide variations in the atmosphere of Srednja Bijambarska Cave, Bosnia and Herzegovina. *Boundary-layer meteorology*, *131*(3), 479-493.

Millington, R. J., & Quirk, J. P. (1961). Permeability of porous solids. *Transactions of the Faraday Society*, *57*, 1200-1207.

Minvielle S., (2015), Etude de l'infiltration et de ses variations interannuelles en contexte épikarstique pour la caractérisation du fonctionnement des hydrosystèmes karstiques : utilisation de la méthode ISc-PCO_2 et des modèles réservoirs, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 302p.

Miyajima, T., Miyajima, Y., Hanba, Y. T., Yoshii, K., Koitabashi, T., & Wada, E. (1995). Determining the stable isotope ratio of total dissolved inorganic carbon in lake water by GC/C/IIRMS. *Limnology and Oceanography*, *40*(5), 994-1000.

Moldrup, P., Olesen, T., Yamaguchi, T., Schjønning, P., & Rolston, D. E. (1999). Modeling diffusion and reaction in soils: IX. The Buckingham-Burdine-Campbell equation for gas diffusivity in undisturbed soil. *Soil Science*, *164*(8), 542-551.

Moldrup, P., Olesen, T., Gamst, J., Schjønning, P., Yamaguchi, T., & Rolston, D. E. (2000). Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil water-induced linear reduction model. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(5), 1588-1594.

Moldrup, P., Olesen, T., Gamst, J., Schjønning, P., Yamaguchi, T., & Rolston, D. E. (2000). Predicting the gas diffusion coefficient in repacked soil water-induced linear reduction model. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(5), 1588-1594.

Mook, W. G., Bommerson, J. C., & Staverman, W. H. (1974). Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon dioxide. *Earth and Planetary Science Letters*, *22*(2), 169-176.

Mudarra, M., Andreo, B., & Baker, A. (2011). Characterisation of dissolved organic matter in karst spring waters using intrinsic fluorescence: Relationship with infiltration processes. *Science of the total environment*, *409*(18), 3448-3462.

Mudry, J. (1981). Sur l'origine des gradients de teneurs isotopiques et géochimiques dans les eaux karstiques du Jura (France). *Journal of Hydrology*, *50*, 167-178.

N, O, P

Nelson, T., Harpster, M. H., Mayfield, S. P., & Taylor, W. C. (1984). Light-regulated gene expression during maize leaf development. *The Journal of cell biology*, *98*(2), 558-564.

Penman, H. L. (1940). Gas and vapour movements in the soil: II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *The Journal of Agricultural Science*, *30*(04), 570-581.

Perrin D., (2005). Flux de respiration de sols forestiers : analyse et modélisation à différentes échelles spatiales et temporelles. Thèse de doctorat : Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (Belgique).

Perrin S., (2014). Expertise des peuplements forestiers appartenant à l'état et en cours d'acquisition sur la colline de Lascaux. *Rapport d'étude, Forêt Conseils*, 98p.

Peyraube N., (2011) Apports des équilibres calco-carboniques et du carbone 13 pour l'étude de l'air et des écoulements d'eau dans la zone non saturée du karst. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 350p.

Peyraube, N., Lastennet, R., & Denis, A. (2012). Geochemical evolution of groundwater in the unsaturated zone of a karstic massif, using the PCO_2–SIc relationship. *Journal of Hydrology*, *430*, 13-24.

Peyraube, N., Lastennet, R., Denis, A., & Malaurent, P. (2013). Estimation of epikarst air PCO_2 using measurements of water $\delta^{13}C$ TDIC, cave air PCO_2 and $\delta^{13}CCO_2$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *118*, 1-17.

Peyraube, N., Lastennet, R., Villanueva, J. D., Houillon, N., Malaurent, P., & Denis, A. (2016). Effect of diurnal and seasonal temperature variation on Cussac cave ventilation using CO_2 assessment. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14.

Peyrony, D. (1949). L'art pictural de la grotte de Lascaux et celui dit : « Levantin espagnol ». Dans *Bulletin de la Société préhistorique de France, Tome 46* (p. 117).

Poulenard J., (2014) Etude des sols du site de la Grotte de Lascaux*, Rapport d'étude, Edytem*, Université de Savoie, 69 p.

Pumpanen, J., Ilvesniemi, H., Kulmala, L., Siivola, E., Laakso, H., Kolari, P., & Hari, P. (2008). Respiration in boreal forest soil as determined from carbon dioxide concentration profile. *Soil Science Society of America Journal*, *72*(5), 1187-1196.

Q, R

Qualls, R. G., & Haines, B. L. (1992). Biodegradability of dissolved organic matter in forest throughfall, soil solution, and stream water. *Soil Science Society of America Journal*, *56*(2), 578-586.

Quinif Y., (1999). Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. *Actes du colloque européen Karst-99*, pp. 159-164.

Renault P., (1968). Sur la distinction de plusieurs régions karstiques en raison de la teneur en anhydride carbonique des atmosphères de grottes, C. R. Acad. Sci. Paris 267, 2288–229.

Riechelmann, D. F., Deininger, M., Scholz, D., Riechelmann, S., Schröder-Ritzrau, A., Spötl, C., & Immenhauser, A. (2013). Disequilibrium carbon and oxygen isotope fractionation in

recent cave calcite: Comparison of cave precipitates and model data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *103*, 232-244.

Rochette, E. A., Drever, J. I., & Sanders, F. S. (1988). Chemical weathering in the West Glacier Lake drainage basin, Snowy Range, Wyoming; implications for future acid deposition. *Rocky Mountain Geology*, *26*(1), 29-44.

Roques H., (1964). Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate, *annales de spéléologie*, vol. 19, pp 255-484, 230p.

Rousk, J., & Bååth, E. (2007). Fungal biomass production and turnover in soil estimated using the acetate-in-ergosterol technique. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*(8), 2173-2177.

S

Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1978). The photosynthesis-transpiration compromise. *SALISBURY, FB; ROSS, CW Plant physiology*, *4*, 66-92.

Sánchez-Cañete, E., Serrano-Ortiz, P., Domingo, F., & Kowalski, A. (2013). Cave ventilation is influenced by variations in the CO_2-dependent virtual temperature. *International Journal of Speleology*, *42*(1), 1–8. https://doi.org/10.5038/1827-806X.42.1.1

Sanchez-Cañete, E. P., Serrano-Ortiz, P., Kowalski, A. S., Oyonarte, C., & Domingo, F. (2011). Subterranean CO_2 ventilation and its role in the net ecosystem carbon balance of a karstic shrubland: CO_2 VENTILATION AND ITS ROLE IN THE NECB. *Geophysical Research Letters*, *38*(9), n/a-n/a. https://doi.org/10.1029/2011GL047077

Sánchez-Cañete, E. P., Oyonarte, C., Serrano-Ortiz, P., Curiel Yuste, J., Pérez-Priego, O., Domingo, F., & Kowalski, A. S. (2016). Winds induce CO_2 exchange with the atmosphere and vadose zone transport in a karstic ecosystem: Dynamics of CO_2 within the vadose zone. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. https://doi.org/10.1002/2016JG003500

Sanchez-Moral, S., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sanz-Rubio, E., Van Grieken, R., & Gysels, K., (1999). Inorganic deterioration affecting the Altamira cave, N Spain: quantitative approach to wall-corrosion (solution etching) processes induced by visitors. *STE* 243, 67–84.

Savoy, L., Surbeck, H., & Hunkeler, D. (2011). Radon and CO 2 as natural tracers to investigate the recharge dynamics of karst aquifers. *Journal of hydrology*, *406*(3), 148-157.

Schoeller, H. (1965). Etude géologique, hydrogéologique et climatologique de la grotte de Lascaux pendant le cycle 1945-1965. Gif-sur-Yvette: Ministère de l'Education Nationale - centre de recherches hydrobiologiques Gif-sur-Yvette.

Scholz, D., Muhlinghaus, C., and Mangini, A., (2009). Modelling $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ in the solution layer on stalagmite surfaces, *Geochim. Cosmochim.*

Simunek J. & Suarez D., (1993). Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: model development. *Water Resour. Res., 29*, p487-p497.

Smart P.L., & Friederich H., (1986). Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate, Mendip Hill, *England, Environmental problems in karst terranes and their solution conference*, october 1986, Bowling Green, Kentucky, pp 59-87, 30p.

Spötl, C., Fairchild, I.J., & Tooth, A.F., (2005). Cave air control on dripwater geochemistry, Obir Caves (Austria): Implications for speleothem deposition in dynamically ventilated caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, 2451–2468. doi:10.1016/j.gca.2004.12.009

Stenström J., Svensson K. & Johansson M., (2001). Reversible transition between active and dormant microbial states in soil. *FEMS Microbiol. Ecol., 36*, p93-p104.

Strickland, J. D., & Parsons, T. R. (1972). A practical handbook of seawater analysis.

Svensson, U., & Dreybrodt, W. (1992). Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO 2-water systems approaching calcite equilibrium. *Chemical Geology*, *100*(1), 129-145.

T

Tissier, G., Perrette, Y., Dzikowski, M., Poulenard, J., Hobléa, F., Malet, E., & Fanget, B. (2013). Seasonal changes of organic matter quality and quantity at the outlet of a forested karst system (La Roche Saint Alban, French Alps). *Journal of Hydrology*, *482*, 139-148.

Thurman, E. M. (1985). Amount of organic carbon in natural waters. In *Organic geochemistry of natural waters* (pp. 7-65). Springer Netherlands.

Trauth N., Astruc G., Archanjo J., Dubreuilh J., Martin P., Cauliez N. et Fauconnier D. (1985). Géodynamique des altérations ferralitiques sur roches sédimentaires, en bordure sud-ouest crétacée du Massif Central : paysages sidérolithiques en Quercy Blanc, Haut Agenais, Bouriane et Périgord Noir. *Géologie de la France*, n°2, pp 151-160.

Trček B., (2007). How can the epikarst zone influence the karst, aquifer hydraulic behaviour?, Environmental Geology , vol. 51, pp 761-765, 5p.

Tremaine, D. M., Froelich, P. N., & Wang, Y. (2011). Speleothem calcite farmed in situ: modern calibration of δ 18 O and δ 13 C paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *75*(17), 4929-4950.

Troester, J.W., White, & W., (1984). Seasonal fluctuations in the carbon dioxide partial pressure in a cave atmosphere. WRR 20, 153–156.

V, W, X, Y, Z

Vargas R. & Allen M.F., (2008). Environmental controls and the influence of vegetation type, fine roots and rhizomorphs on diel and seasonal variation in soil respiration. *New Phytol., 179(2),* p460-p471.

Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jiménez, P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 912-925.

Vesper D.J., White W.B., (2004). Storm pulse chemographs of saturation index and carbon dioxide pressure: implications for shifting recharge sources during storm events in the karst aquifer at Fort Campbell, Kentucky/Tennessee, USA, *Hydrogeology Journal*, vol. 12, pp 135–143, 9p.

Vouve J. (1968). Colline de Lascaux (commune de Montignac). Détermination d'un modèle karstique original en pays calcaire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 266*, p2139-2142.

Walvoord, M. A., Striegl, R. G., Prudic, D. E., & Stonestrom, D. A. (2005). CO_2 dynamics in the Amargosa Desert: Fluxes and isotopic speciation in a deep unsaturated zone. *Water resources research*, *41*(2).

Wardle D.A. & Lavelle P., (1997). Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. *In:* Cadisch G. & Giller K.E., eds. *Driven by nature: plant litter quality and decomposition. Wallingford, USA: CABI Publishing*, p107-p124.

Waring, R. H., & Schlesinger, W. H. (1985). Forest ecosystems. Concepts and management. *Academic Press*.

Wassenaar, L., & Aravena, R. (1991). Radiocarbon in Dissolved Organic Carbon, A Possible Groundwater. *Water Resources Research*, *27*(8), 1975-1986.

Weisbrod, N., Dragila, M. I., Nachshon, U., & Pillersdorf, M. (2009). Falling through the cracks: The role of fractures in Earth-atmosphere gas exchange. *Geophysical Research Letters*, *36*(2).

White, W. B. (1988). Geomorphology and hydrology of karst terrains (No. 551.447 W4).

Williams, P. W. (1983). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of hydrology*, *61*(1-3), 45-67.

Williams, P. W. (2008). The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, *37*(1), 1.

Wood, W. W., & Petraitis, M. J. (1984). Origin and distribution of carbon dioxide in the unsaturated zone of the southern high plains of Texas. *Water Resources Research*, *20*(9), 1193-1208.

XU S., (2015), Caractérisation de l'environnement karstique de la grotte de Lascaux par couplage de méthodes géophysique, statistique et géostatistique, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 302p.

Zelinka, J., (2002). Microclimatic research in the Slovakian show caves. *Acta Carsologica*, 31 (1), 151-163.

Zhou, X., Wan, S., & Luo, Y. (2007). Source components and interannual variability of soil CO_2 efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, *13*(4), 761-775.

Table des matières

I. INTRODUCTION GENERALE 27

I.1 PARTICULARITES DU MILIEU KARSTIQUE : IMPLICATIONS POUR L'ETUDE DES ECOULEMENTS DANS LA ZONE NON SATUREE. 30

I.1.1 LE PROCESSUS DE KARSTIFICATION 30

I.1.2 STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE LA ZNS 33

I.1.2.1 Le sol 33

I.1.2.2 L'épikarst 34

I.1.2.3 La zone de transmission 36

I.2 OBJET DE L'ETUDE : LA GROTTE DE LASCAUX 37

I.2.1 PATRIMOINE ARCHEOLOGIQUE DE LA GROTTE DE LASCAUX 38

I.2.2 DE LA DECOUVERTE A LA PROTECTION DE LA GROTTE DE LASCAUX 39

I.2.2.1 De 1940 à 1963 : adaptation de la grotte aux visites 39

I.2.2.2 De 1963 à nos jours : priorité à la conservation du monument 40

I.3 PROBLEMATIQUES DE L'ETUDE 42

I.3.1 OBJECTIFS DE RECHERCHE 42

I.3.1.1 La dynamique du CO_2 dans la zone vadose du karst 43

I.3.1.2 Les conditions et modalités d'écoulement dans la zone vadose du karst 44

I.3.2 OBJECTIFS DE RECHERCHE APPLIQUES A LA CONSERVATION DE LA GROTTE DE LASCAUX 45

I.3.2.1 La dynamique du CO_2 et l'aérologie de la cavité de Lascaux 46

I.3.2.2 Les équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux 47

I.3.2.3 L'impact du pompage de l'air sur l'aérologie et les équilibres des eaux aux parois de la cavité de Lascaux : 50

I.4 STRATEGIE MISE EN ŒUVRE 50

I.4.1 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 50

I.4.2 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 51

I.4.3 LES CONDITIONS ET MODALITES D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 51

I.4.4 LES SIMULATIONS DES IMPACTS POTENTIELS DES EAUX AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX 52

I.5 ORGANISATION GENERALE DU MANUSCRIT DE THESE 52

II. PRESENTATION DU CONTEXTE DE L'ETUDE : LA COLLINE DE LASCAUX 53

II.1 CONTEXTES GEOLOGIQUE ET CLIMATOLOGIQUE DU SITE DE LA COLLINE DE LASCAUX 55

II.1.1 CLIMATOLOGIE 55
II.1.1.1 Les dispositifs de mesure des paramètres hydroclimatiques sur le site de la grotte de Lascaux 55
II.1.1.2 Conditions climatiques des années 2013 à 2016 56
II.1.2 GEOLOGIE DE LA COLLINE ET DU SITE DE LASCAUX 62
II.1.2.1 Contexte géologique régional 62
II.1.2.2 Géologie et géomorphologie de la colline de Lascaux 66
II.1.2.3 Géologie du site de la grotte de Lascaux 67
II.1.2.4 Couvertures végétale et pédologique du site de la grotte de Lascaux 69
II.2 GEOMORPHOLOGIE ET AMENAGEMENTS DE LA CAVITE DE LASCAUX 72
II.2.1 GEOMORPHOLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 72
II.2.2 AMENAGEMENTS REALISES PAR L'HOMME 77
II.2.2.1 Les Sas de sécurité 77
II.2.2.2 La machinerie de conditionnement de l'air 78
II.2.2.3 L'extracteur d'air 80
II.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE LOCAL 81
II.3.1 HYDROGEOLOGIE DE LA COLLINE DE LASCAUX 81
II.3.2 LES ECOULEMENTS DANS LA CAVITE DE LASCAUX 84
II.4 RESUME DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES, GEOMORPHOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DU SITE D'ETUDE 91

III. LA DYNAMIQUE DU DIOXYDE DE CARBONE DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 93

III.1 ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST 96
III.1.1 LE CO_2 DANS LES SOLS ET LA ZONE VADOSE SOUS-JACENTE 96
III.1.1.1 Le processus de photosynthèse : fixateur du carbone minéral atmosphérique 97
III.1.1.2 La production du CO_2 dans les sols : fixation du carbone atmosphérique et respirations autotrophe et hétérotrophe. 98
III.1.1.2.1 La respiration autotrophe dans les sols 99
III.1.1.2.2 La respiration hétérotrophe dans les sols 100
III.1.1.3 Le transport du CO_2 dans les sols et les massifs rocheux fracturés ou karstifiés 101
III.1.1.3.1 Le transport par diffusion 101
III.1.1.3.2 Le transport par advection 102
III.1.2 LE SIGNAL ISOTOPIQUE DU CO_2 DE L'AIR DU SOL ET DU MASSIF : 103
III.1.2.1 Définition de la composition isotopique : 103

III.1.2.2 Fractionnement isotopique du CO_2 dans les sols : 104
III.1.2.2.1 Fractionnement lié à la photosynthèse et à la composante autotrophe 106
III.1.2.2.2 Fractionnement lié à la composante hétérotrophe 106
III.1.2.2.3 Fractionnement lié aux processus de transport du CO_2 108
III.1.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA ZONE VADOSE DU KARST : 108
III.1.3.1 Le cas de la zone vadose de la colline de Lascaux 108
III.1.3.2 Dernières avancées dans le domaine karstique 111
III.2 MATERIEL ET METHODE : DEVELOPPEMENT ET INSTRUMENTATION D'UNE PARCELLE EXPERIMENTALE. 112
III.2.1 LOCALISATION ET INSTRUMENTATION DE LA PARCELLE EXPERIMENTALE 113
III.2.1.1 Détermination d'une zone de mesure adéquate 113
III.2.1.2 Implantation et description des différents forages 115
III.2.1.3 Instrumentation de la parcelle expérimentale : 117
III.2.2 DEVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF DE MESURE EN CONTINU DU FLUX DE CO_2 SORTANT DU SOL 120
III.2.2.1 Principe et description de la mesure 120
III.2.2.2 Démarche de traitement des données brutes 122
III.2.3 SUIVIS PONCTUELS ANNEXES 124
III.2.3.1 Les teneurs en CO_2 dans les sols de la parcelle expérimentale 124
III.2.3.2 Les prélèvements pour l'étude du signal isotopique du $\delta\ ^{13}C$-CO_2 dans l'épikarst 125
III.3 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS L'EPIKARST DE LASCAUX ET LES FORMATIONS DETRITIQUES SABLO-ARGILEUSES ASSOCIEES 126
III.3.1 DONNEES DISPONIBLES : 126
III.3.1.1 Les flux de CO_2 ascendants sol/atmosphère 126
III.3.1.2 Les PCO_2 mesurées dans les sols : 127
III.3.1.3 Les PCO_2 enregistrées dans les forages de la parcelle expérimentale 130
III.3.1.4 Les paramètres hydroclimatiques 136
III.3.1.5 Les données isotopiques 141
III.3.1.6 Les difficultés rencontrées 142
III.3.2 ORIGINE ET REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU CO_2 DANS LES SOLS DE LA PARCELLE EXPERIMENTALE 144
III.3.2.1 Le signal isotopique du δ13C-CO_2, marqueur de l'origine du CO_2 144
III.3.2.2 La dynamique du CO_2 dans les sols 145
III.3.2.3 Influence de la teneur en eau sur la variabilité temporelle des flux de CO_2 émanant des sols de la parcelle expérimentale 149
III.3.3 INTERPRETATION DE LA REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DU CO_2 DANS L'EPIKARST ET LES FORMATIONS DETRITIQUES ASSOCIEES 153
III.3.3.1 Mécanismes responsables de l'accumulation et des transferts du CO_2 dans le massif 153

III.3.3.1.1 Accumulation et transfert advectif du CO_2 sous l'effet de la saturation en eau du milieu 153
III.3.3.1.2 Les transferts advectifs dans le massif sous l'influence des gradients de température 162
III.3.3.1.3 Les transferts advectifs dans le massif sous l'influence des variations barométriques 165
III.3.3.2 Echanges horizontaux entre altérites et épikarst 168
III.3.4 MODELE CONCEPTUEL DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS L'EPIKARST ET LES ALTERITES DU SITE DE LA GROTTE DE LASCAUX 170
III.3.4.1 Une dynamique fortement influencée par les variations hydroclimatiques et le faciès pédo-géologique 171
III.3.4.2 Perspectives d'étude 176

IV. DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA GROTTE DE LASCAUX 177

IV.1 PREREQUIS POUR L'ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET DE L'AEROLOGIE DES CAVITES KARSTIQUES 181
IV.1.1 LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LES CAVITES KARSTIQUES 181
IV.1.1.1 Origine du CO_2 dans les cavités karstiques 181
IV.1.1.2 Mécanismes responsables de la dynamique du CO_2 dans les cavités karstiques 182
IV.1.1.3 La composition isotopique du CO_2 dans les cavités karstiques : marqueur de l'origine et des échanges avec l'atmosphère 183
IV.1.2 ETAT DE L'ART POUR L'ETUDE DE L'AEROLOGIE DES CAVITES : 185
IV.1.3 ETAT DES CONNAISSANCES SUR L'AEROLOGIE DE LA CAVITE DE LASCAUX 187
IV.2 MATERIEL ET METHODE 189
IV.2.1 SUIVI EN CONTINU DES PARAMETRES HYDROCLIMATIQUES EXTERNES ET INTERNES AINSI QUE DES TENEURS EN CO_2 DANS LA CAVITE 189
IV.2.1.1 Les mesures hydroclimatiques extérieures 189
IV.2.1.2 Les mesures hydroclimatiques et des PCO_2 dans la cavité 190
IV.2.2 LES PRELEVEMENTS D'AIR POUR L'ETUDE DU SIGNAL ISOTOPIQUE DU $\Delta^{13}C$-CO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX 193
IV.2.3 L'ARRET DE L'EXTRACTION POUR L'ETUDE DE L'IMPACT DU POMPAGE SUR L'AEROLOGIE DE LA CAVITE 194
IV.3 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DANS LA CAVITE DE LASCAUX EN CONTEXTE DE POMPAGE 195
IV.3.1 LES DONNEES DISPONIBLES 196
IV.3.1.1 Les teneurs en CO_2 196
IV.3.1.1.1 Les données isotopiques 200
IV.3.1.1.2 Les données de température de l'air et de la roche 201
IV.3.2 LES ECHANGES ENTRE L'ATMOSPHERE ET LA CAVITE 207

IV.3.2.1 Etude des différences de masse volumique entre atmosphère et cavité 207
IV.3.2.2 Le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 : marqueur des entrées de CO_2 atmosphérique dans la cavité ? 209
IV.3.3 PRINCIPAUX MECANISMES AEROLOGIQUES INTERNES A L'ORIGINE DE LA REPARTITION DES PCO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX : 212
IV.3.3.1 Influence de la pression atmosphérique sur les teneurs en CO_2 dans la cavité : 212
IV.3.3.1.1 Zone Axiale et Droite 212
IV.3.3.1.2 La Grande Diaclase 214
IV.3.3.2 Stratification et homogénéisation des masses d'air par la mise en place de cellules de convections 216
IV.3.3.2.1 Zone Axiale et Zone droite 216
IV.3.3.2.2 La Grande Diaclase 220
IV.3.3.3 Conclusion sur la dynamique du CO_2 dans la cavité de Lascaux en contexte de pompage 222
IV.4 LA DYNAMIQUE DU CO_2 ET L'AEROLOGIE DANS LA CAVITE EN CONTEXTE NATUREL : 229
IV.4.1 LES DONNEES DISPONIBLES 229
IV.4.1.1 Les teneurs en CO_2 229
IV.4.1.2 Les données isotopiques : 233
IV.4.1.2.1 Les données de température de l'air et de la roche 234
IV.4.2 ECHANGES ENTRE ATMOSPHERE ET CAVITE 240
IV.4.2.1 Etude des différences de masse volumique entre atmosphère et cavité sans pompage 240
IV.4.2.2 Le signal isotopique du $\delta^{13}C$-CO_2 dans la cavité de Lascaux sans pompage 242
IV.4.3 PRINCIPAUX MECANISMES AEROLOGIQUES INTERNES A L'ORIGINE DE LA REPARTITION DES PCO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX : 246
IV.4.3.1 Influence de la pression atmosphérique sur les teneurs en CO_2 dans la cavité : 246
IV.4.3.2 Stratification et homogénéisation des masses d'air par la mise en place de cellules de convections 251
IV.4.3.2.1 Zones Axiale et droite 251
IV.4.3.2.2 Grande Diaclase 253
IV.4.4 CONCLUSION SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 DANS LA CAVITE DE LASCAUX EN PERIODE D'ARRET DE L'EXTRACTEUR 255
IV.5 CONCLUSION SUR LA DYNAMIQUE DU CO_2 EN CONTEXTES DE POMPAGE ET NATUREL 262

V. ETUDE PAR LE SUIVI EN CONTINU DES TRACEURS NATURELS DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST ET DE LEURS IMPACTS SUR LA VARIABILITE DES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES AUX EMERGENCES. SIMULATIONS DES PROCESSUS CALCO-CARBONIQUES AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX. 271

V.1 ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE DES MODALITES D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE A L'AIDE DES TRACEURS NATURELS ET ISOTOPIQUES 274

V.1.1 LE COD, TRACEUR DES CONDITIONS D'ECOULEMENT ET DES TEMPS DE RESIDENCE DANS LE KARST 274

V.1.2 UTILISATION DES ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU COMME MARQUEURS DU TEMPS DE SEJOUR DANS LE KARST : 277

V.1.3 LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES ET LE Δ^{13}C-CMTD, INDICATEURS DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LE KARST 278

V.1.3.1 Théorie pour l'étude des équilibres calco-carboniques 278

V.1.3.1.1 La PCO_2 équilibrante 279

V.1.3.1.2 L'indice de saturation vis-à-vis de la calcite 279

V.1.3.1.3 Définition et utilisation de la PCO_2 à saturation 281

V.1.3.1.4 Le repère (-log (PCO_2eq) ; ISc) 281

V.1.3.1.5 Définition des paramètres intrinsèques à une émergence 282

V.1.3.2 Théorie pour l'étude du signal isotopique du CMTD 283

V.2 MATERIEL ET METHODE : SUIVI EN CONTINU ET PONCTUEL DE L'HYDROGEOCHIMIE DES EAUX DE LA ZONE VADOSE 286

V.2.1 SUIVIS PONCTUELS DES EAUX DE LA ZONE VADOSE 286

V.2.1.1 Les différents types d'eau et les paramètres hydrogéochimiques et isotopes étudiés 286

V.2.1.2 Analyses en laboratoire 288

V.2.2 DEVELOPPEMENT DU MONITORING EN CONTINU DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES DE L'EMERGENCE EPIKARSTIQUE DU SAS 1 290

V.2.2.1 Contraintes liées au site d'étude 290

V.2.2.2 Description du dispositif de suivi en continu 291

V.3 ETUDE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST DE LA COLLINE DE LASCAUX : APPORTS DU SUIVI DES TRACEURS NATURELS ET ISOTOPIQUES 293

V.3.1 LES DONNEES HYDROGEOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES DISPONIBLES 293

V.3.1.1 La chimie et l'isotopie des pluies 293

V.3.1.2 La chimie des eaux du sol 299

V.3.1.3 La chimie et l'isotopie des eaux du SAS 1 et de la Haute Fageotte 303

V.3.1.4 Les séries temporelles des paramètres hydrogéochimiques intrinsèques des eaux du SAS 1 308

V.3.2 ANALYSE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST DE LA GROTTE DE LASCAUX PAR L'ETUDE DES TRACEURS NATURELS 313

V.3.2.1 Variabilité à l'échelle saisonnière des conditions d'écoulement dans l'épikarst : des conditions d'écoulement variables au cours du cycle d'écoulement 314

V.3.2.2 Variabilité des conditions d'écoulement à l'échelle de l'épisode : 317
V.3.2.3 Variabilité interannuelle des conditions d'écoulement dans l'épikarst : 320
V.3.3 LES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE DE TRANSMISSION 324
V.3.4 INFLUENCE DES CONDITIONS D'ECOULEMENT DANS LA ZONE VADOSE DU KARST SUR LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX AUX EMERGENCES DU KARST DE LA COLLINE DE LASCAUX : 328
V.3.4.1 Variabilité spatiale des équilibres calco-carboniques des eaux de la zone vadose de Lascaux 328
V.3.4.2 Corrélation entre pression partielle de CO_2 dans l'épikarst et pression de CO_2 à saturation vis-à-vis de la calcite 331
V.3.4.3 Variabilité des équilibres calco-carboniques liée aux conditions d'écoulement dans la zone vadose 333
V.3.5 CONCLUSIONS SUR LES MODALITES D'ECOULEMENT DANS L'EPIKARST ET DE LEUR IMPACT SUR LES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX ARRIVANT DANS LA CAVITE 336
V.4 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE DE SIMULATION HYDROGEOCHIMIQUE DU COMPORTEMENT DES EAUX DE CONDENSATION ET D'EXFILTRATION AUX PAROIS DE LA CAVITE DE LASCAUX 338
V.4.1 ENJEUX DE L'ETUDE DES EQUILIBRES CALCO-CARBONIQUES DES EAUX AUX PAROIS 338
V.4.2 METHODOLOGIE ET LIMITES DE LA DEMARCHE DE SIMULATION DEVELOPPEE 341
V.4.2.1 Description générale de la démarche de simulation 341
V.4.2.2 Choix et attribution de valeurs aux paramètres d'entrée 345
V.4.2.3 Simulations hydrogéochimiques par le code PHREEQC et calcul de la masse de calcite dissoute ou précipitée théorique 346
V.4.2.4 Estimations des volumes d'eau de condensation et d'exfiltration aux parois 346
V.4.2.5 Les limites de la simulation numérique pour l'étude des processus de dissolution et de précipitation de calcite aux parois 348
V.4.3 ESTIMATION DE LA MASSE DE CALCITE AFFECTEE THEORIQUE ET DE L'IMPACT DES PRINCIPAUX PARAMETRES D'ENTREE SUR LE RESULTAT FINAL 349
V.4.3.1 Résultats des simulations de la masse de calcite théorique affectée par des eaux de condensation et d'exfiltration 349
V.4.3.2 Impacts des paramètres d'entrée 349
V.4.3.2.1 Impact du gradient de température entre air et paroi sur le volume d'eau condensable calculé 349
V.4.3.2.2 Impact du volume d'eau sur les masses de calcite dissoutes et précipitées 351
V.4.3.2.3 Impact de la PCO_2 de l'air sur les temps de mise à l'équilibre des eaux de condensation et d'exfiltration avec le support calcitique 352
V.4.3.2.4 Le signal géochimique initial de l'eau d'exfiltration 354

V.4.4 APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A LA PAROI GAUCHE DE LA SALLE DES TAUREAUX DE LA CAVITE DE LASCAUX 356
V.4.4.1 Détermination des relations liant PCO_2 de l'air et masse de calcite affectée par les processus de dissolution et de précipitation 356
V.4.4.2 Avec pompage de l'air de la cavité 359
V.4.4.3 Sans pompage de l'air de la cavité 361
V.4.5 DISCUSSION SUR L'IMPACT DU POMPAGE ET LES PERSPECTIVES D'AMELIORATION DE LA METHODE 364

VI. CONCLUSION GENERALE 367

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 375

ANNEXES 401

Annexes

Liste des annexes :

Annexe 1 : Carte des formes, des altérites et des formations superficielles de la colline de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014). 404

Annexe 2 : Carte des systèmes colluviaux sur le site de la grotte de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014) 405

Annexe 3 : Logs géologiques des forages FC1, FC2, FC3, FC4, FR1, FR2 et FR3. 406

Annexe 4 : Schéma de l'armoire contenant le dispositif de mesure en continu permettant l'acquisition des mesures et leur transfert au réseau de mesure de la cavité. 408

Annexe 5 : Explication du modèle de simulation des températures utilisé pour déterminer l'évolution des températures à différentes profondeur dans l'épikarst à partir des données de température extérieure. 408

Annexe 6 Nomenclature et informations relatives à la localisation, à la précision et à la sensibilité des capteurs utilisés au cours de l'étude. 410

Annexe 7 : Protocole de surveillance des paramètres microclimatiques et des PCO_2 dans la cavité de Lascaux proposé suite à l'arrêt du pompage. 412

Annexe 8 : Visualisation des résultats des simulations 3D des vitesses d'écoulement d'air dans la cavité de Lascaux montrant les régimes aérologiques de stratification (11/02/2013) et de thermoconvections (31/05/2013) dans les zones axiale, droite et la Grande Diaclase de la Grotte Lascaux. 414

Annexe 9 : Récapitulatif des données hydrochimiques et isotopiques obtenues après les analyses des pluies, eaux du sol, émergence épikarstique et source de la Haute Fageotte. 418

Annexe 10 : Récapitulatif des données isotopiques pour les prélèvements des eaux de pluie, de la Haute Fageotte et de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 431

Annexe 11 : Evolution des paramètres d'entrée des calculs d'équilibres calco-carboniques (températures, pH, HCO3- et Ca2+) à l'émergence épikarstique du SAS et à la source de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 438

Annexe 12 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 et de la source de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 439

Liste des figures des annexes :

Figure-A-1 : Réseau tridimensionnel pour la méthode numérique permettant la simulation des températures en profondeur..... 409

Figure-A-2 : Localisation de la coupe longitudinale de la zone axiale utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013. 414

Figure-A-3 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone axiale de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, le SAS1, la Salle des Machines, le SAS2, la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial. 414

Figure-A-4 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone axiale de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, le SAS1, la Salle des Machines, le SAS2, la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial. 415

Figure-A-5 : Localisation de la coupe longitudinale de la zone droite utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013. 415

Figure-A-6 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone droite de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, la Salle des Taureaux, le Passage, l'Abside, la Nef, la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins. 416

Figure-A-7 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone droite de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, la Salle des Taureaux, le Passage, l'Abside, la Nef, la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins. 416

Figure-A-8 : Localisation de la coupe longitudinale de la Grande Diaclase utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013. 417

Figure-A-9 : Vitesses des écoulements d'air dans la Grande Diaclase de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, l'Abside, le Puits du Sorcier, l'éboulis du Bas de la Diaclase, le Haut de la Diaclase et les Salles Ensablées. 417

Figure-A-10 : Vitesses des écoulements d'air dans la Grande Diaclase de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, l'Abside, le Puits du Sorcier, l'éboulis du Bas de la Diaclase, le Haut de la Diaclase et les Salles Ensablées. 418

Liste des tableaux des annexes :

Tableau-A- 1: Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs dans les eaux de pluie prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016. 419

Tableau-A- 2 : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux du sol prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016. 423

Tableau-A- 3 : : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux de la Haute Fageottel prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016. 424

Tableau-A- 4 : : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016. 427

Tableau-A- 5 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 431

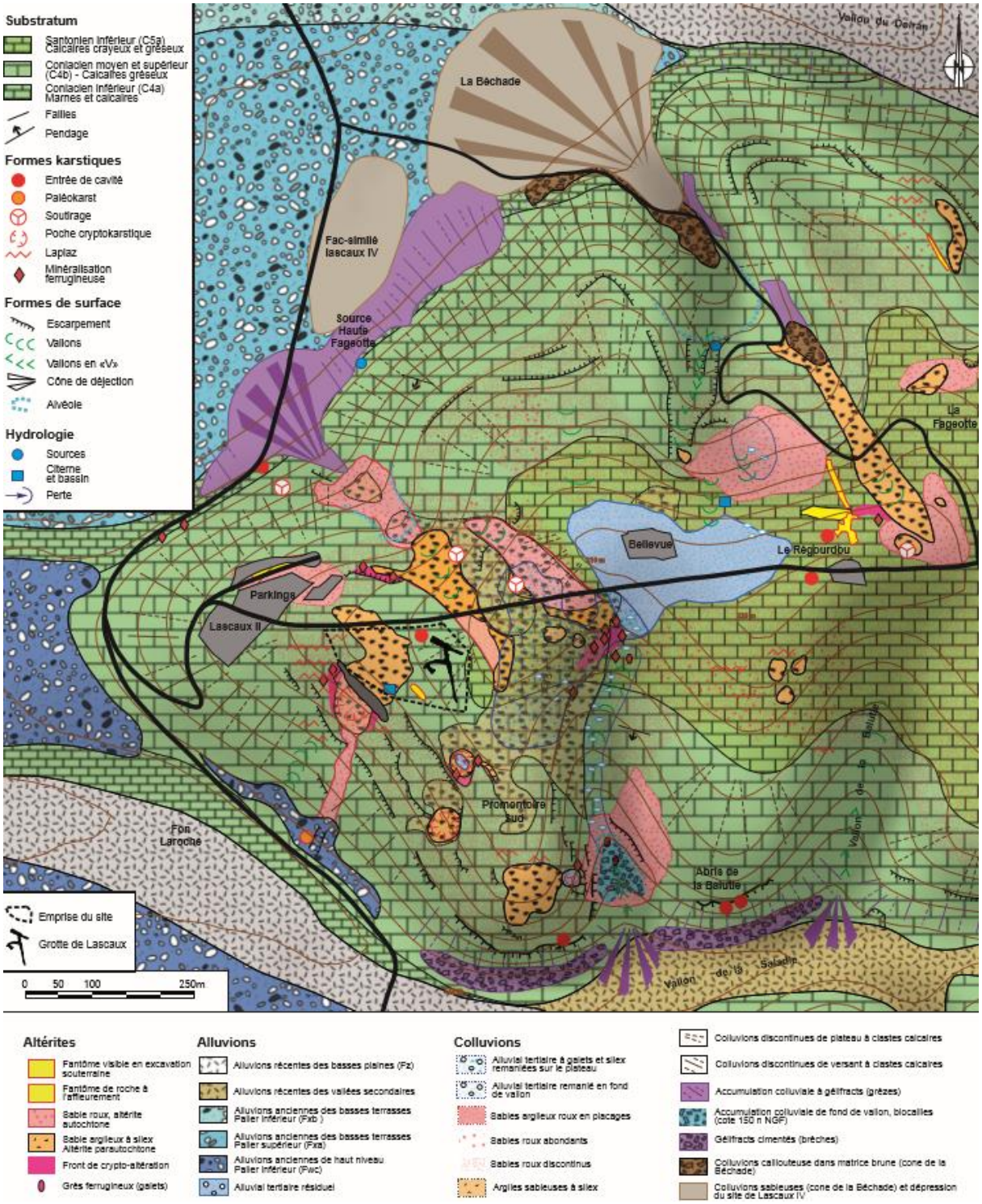
Tableau-A- 6 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 432

Tableau-A- 7 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de pluie effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 434

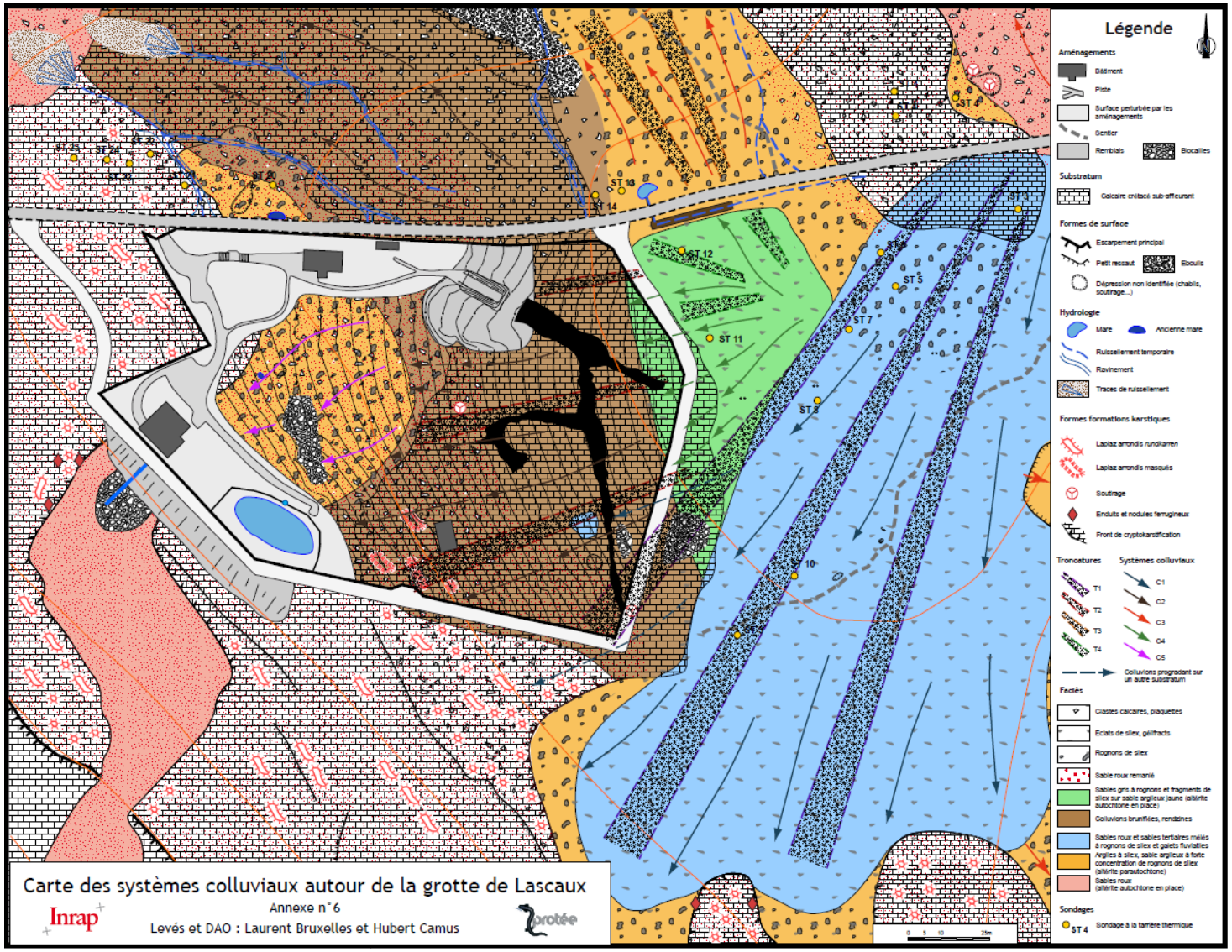
Tableau-A- 8 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 439

Tableau-A- 9 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016. 441

Annexe 1 : Carte des formes, des altérites et des formations superficielles de la colline de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014).



Annexe 2 : Carte des systèmes colluviaux sur le site de la grotte de Lascaux (Bruxelles et Camus, 2014)



Annexe 3 : Logs géologiques des forages FC1, FC2, FC3, FC4, FR1, FR2 et FR3.

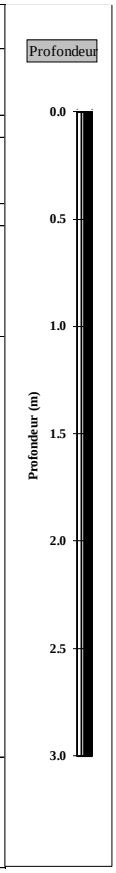
Coupe géologique		FC1
Description des faciès Cote (m): 193.54	**0.00 m**	**Référence des faciès**
Terre végétale (horizon humifère)	**0.10 m**	**Tv**
Calcisol leptique (sablo-argileux à rognons de calcaire)	**0.40 m**	**S-Ca**
Horizon calcaire altéré	**0.50 m**	**Ca-Alt**
Calcaire coniacien supérieur fortement délité et fracturé	**1.00 m**	**Ca-DF**

Niv. eau

Observations:

Arrêt volontaire du sondage 1.00 m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage



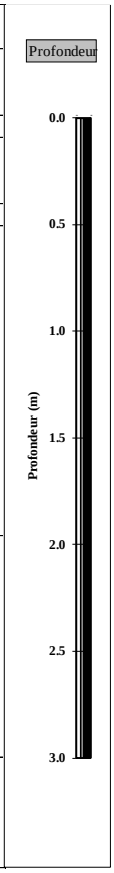
Coupe géologique		FC2
Description des faciès Cote (m): 193.64	**0.00 m**	**Référence des faciès**
Terre végétale (horizon humifère)	**0.10 m**	**Tv**
Calcisol leptique (sablo-argileux à rognons de calcaire)	**0.40 m**	**S-Ca**
Horizon calcaire altéré	**0.50 m**	**Ca-Alt**
Calcaire coniacien supérieur fortement délité et fracturé	**2.00 m**	**Ca-DF**

Niv. eau

Observations:

Arrêt volontaire du sondage à 2.00m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage



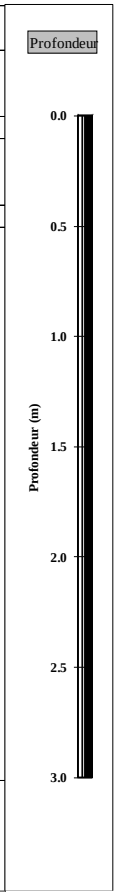
Coupe géologique		FC3
Description des faciès Cote (m): 193.69	**0.00 m**	**Référence des faciès**
Terre végétale (horizon humifère)	**0.10 m**	**Tv**
Calcisol leptique (sablo-argileux à rognons de calcaire)	**0.40 m**	**S-Ca**
Horizon calcaire altéré	**0.50 m**	**Ca-Alt**
Calcaire coniacien supérieur fortement délité et fracturé	**3.00 m**	**Ca-DF**

Niv. eau

Observations:

Arrêt du sondage au refus à 3.00m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage



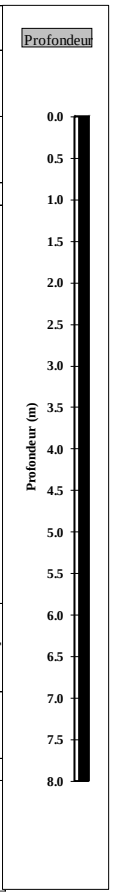
Coupe géologique		FC4
Description des faciès Cote (m): 194.89	**0.00 m**	**Référence des faciès**
Calcisol leptique (sablo-argileux à rognons de calcaire)	**0.75 m**	**S-Ca**
Horizon calcaire altéré	**1.00 m**	**Ca-Alt**
Calcaire coniacien supérieur fortement délité et fracturé	**6.00 m**	**Ca-DF**
Calcaire coniacien supérieur altéré délité et fracturé (zone plus marneuse)	**7.00 m**	**Ca-Alt-DF**
Calcaire coniacien supérieur délité et fracturé	**7.70 m**	**Ca-DF**

Niv. eau

Observations:

Arrêt volontaire du sondage à 8.00m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage

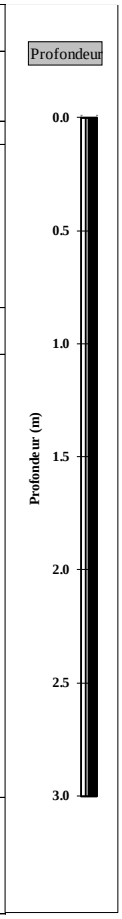


Coupe géologique			FR1
Description des faciès Cote (m): 194.65	0.00 m	Niv. eau	Référence des faciès
Brunisol pseudoluvique (brun sableux)	0.10 m		Tv
Altérite sableuse ocre à rognons de silex	0.80 m		S-Si
Altérite sablo-argileuxe ocre à rognons de silex	1.00 m		Sa-Si

Observations:

Arrêt volontaire du forage 1.00 m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage

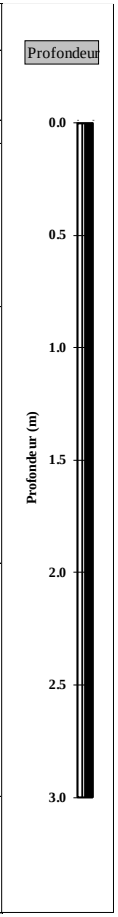


Coupe géologique			FR2
Description des faciès Cote (m): 194.69	0.00 m	Niv. eau	Référence des faciès
Brunisol pseudoluvique (brun sableux)	0.10 m		Tv
Altérite sableuse ocre à rognons de silex	0.80 m		S-Si
Altérite sablo-argileuxe ocre à rognons de silex	2.00 m		Sa-Si

Observations:

Arrêt volontaire du forage à 2.00m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage

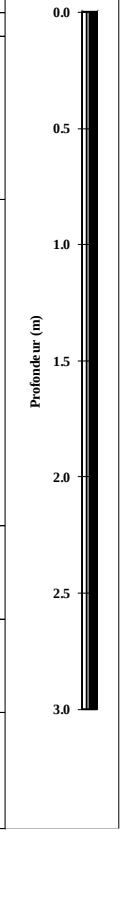


Coupe géologique			FR3
Description des faciès Cote (m): 194.71	0.00 m	Niv. eau	Référence des faciès
Brunisol pseudoluvique (brun sableux)	0.10 m		Tv
Altérite sableuse ocre à rognons de silex	0.80 m		S-Si
Altérite sablo-argileuse ocre à rognons de silex	2.20 m		Sa-Si
Lentille argilo-sableuse ocre à grise avec cailloutis de calcaire	2.60 m		As-Ca
Altérite sablo-argileuse ocre à rognons de silex	3.00 m		Sa

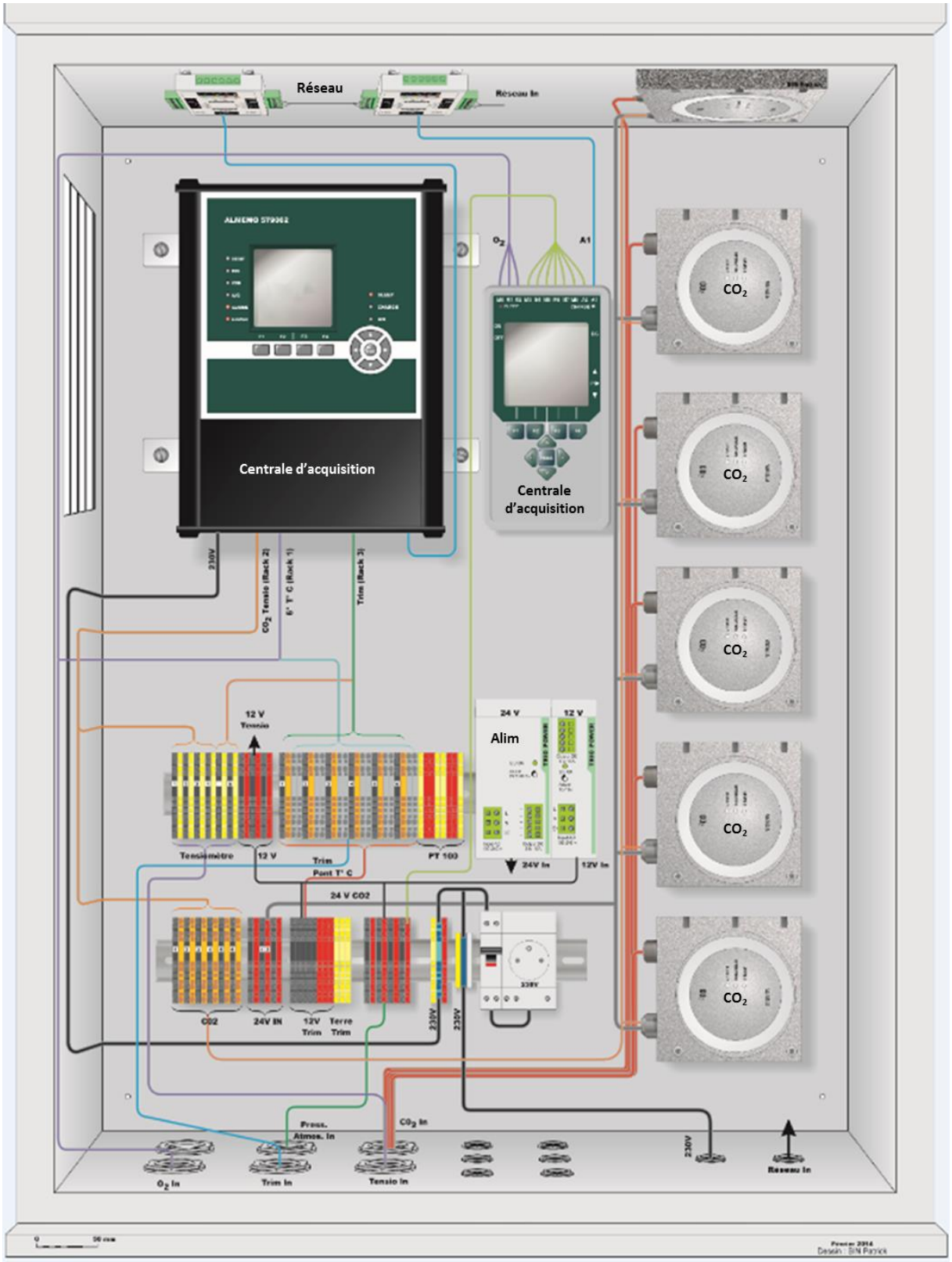
Observations:

Arrêt volontaire du forage à 3.00m de profondeur

Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage



Annexe 4 : Schéma de l'armoire contenant le dispositif de mesure en continu permettant l'acquisition des mesures et leur transfert au réseau de mesure de la cavité.



Annexe 5 : Explication du modèle de simulation des températures utilisé pour déterminer l'évolution des températures à différentes profondeur dans l'épikarst à partir des données de température extérieure.

Pour illustrer la méthode numérique, il faut d'abord transformer l'équation différentielle relative à une répartition des températures dans un solide où la chaleur s'écoule par conduction en régime variable, en une équation à accroissement fini. Ainsi, partant de l'équation 44 avec T la température (K), q la quantité d'énergie locale et a la diffusivité thermique du calcaire ($m^2.h^{-1}$) :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (44)$$

On remplace la première et la seconde dérivée par des termes appropriés sous forme d'accroissement finis. La diffusivité thermique est obtenue à partir de l'équation 45 :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} = \frac{1.7}{880*2340} = 2.97.10^{-3} m^2.h^{-1} \qquad (45)$$

Avec λ la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$), ρ la masse volumique du calcaire ($kg.m^{-3}$) et cp la capacité thermique massique à pression constante ($J.kg^{-1}.K^{-1}$). En prenant le cas général de la conduction tridimensionnelle dans un système homogène tel que représenté en **Figure-A-1**, l'équation 45 peut être mise sous forme d'une équation à accroissement fini (46).

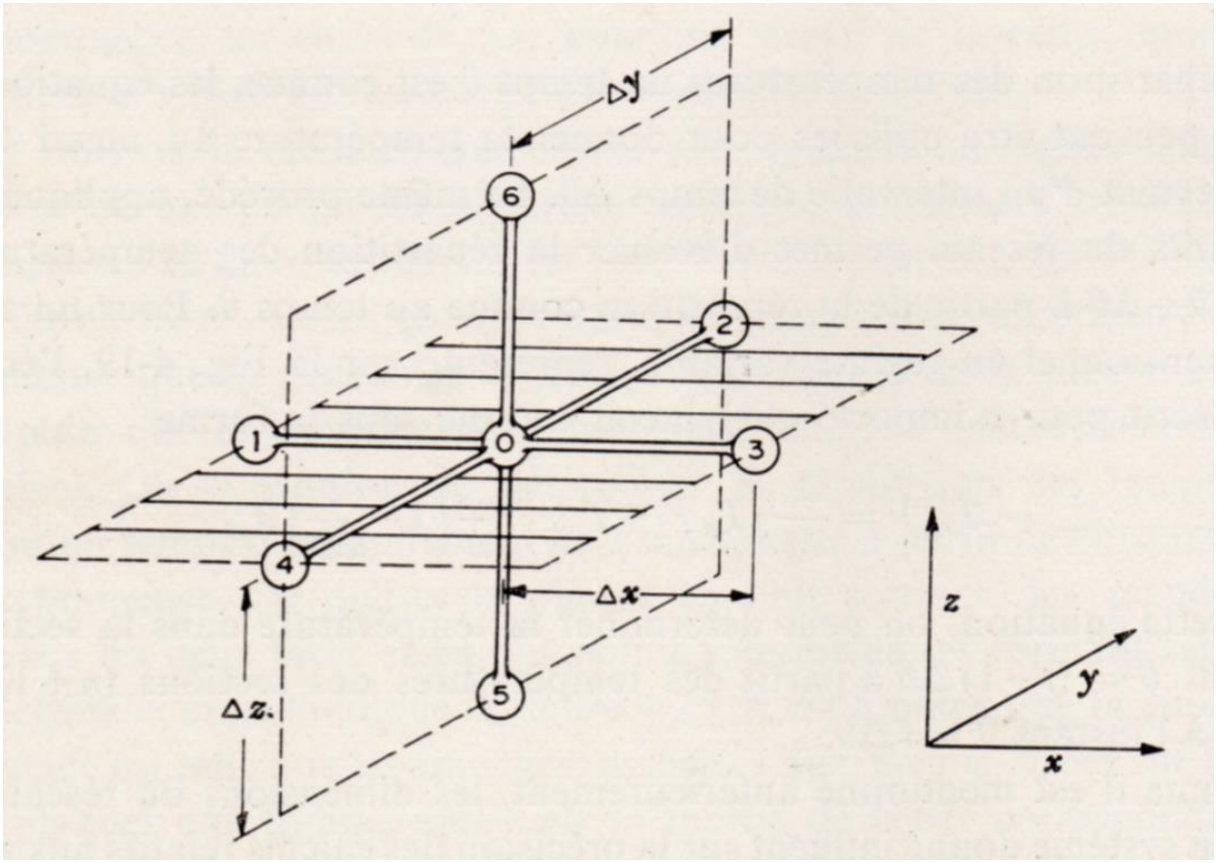


Figure-A-1 : Réseau tridimensionnel pour la méthode numérique permettant la simulation des températures en profondeur.

$$\frac{T_1^t + T_3^t - 2T_0^t}{\Delta x^2} + \frac{T_2^t + T_4^t - 2T_0^t}{\Delta y^2} + \frac{T_5^t + T_6^t - 2T_0^t}{\Delta z^2} + \frac{q_0^t}{k} = \frac{1}{a}\frac{T_0^{t+1} - T_0^t}{\Delta t} \quad (46)$$

Dans laquelle T_0^t, T_1^t et T_2^t etc. sont les températures aux nœuds 0, 1, 2, etc. au temps θ ; T_0^{t+1} est la température au nœud 0 après un intervalle de temps Δt ; et q_0^{-t} est la quantité d'énergie locale par unité de volume engendrée au nœud 0 au temps θ. Si l'on pose Δx = Δy = Δz l'équation 47 devient :

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z$$
$$T_1^t + T_2^t + T_3^t + T_4^t + T_5^t + T_6^t - 6T_0^t + \frac{q_0^t \Delta x^2}{k} = M(T_0^{t+1} - T_0^t) \quad (47)$$

Alors M le coefficient d'itération donné par :

$$M = \frac{\Delta x^2}{a\Delta t} \quad (48)$$

En résolvant l'équation 49 par rapport à l'inconnue T0t+1 on obtient alors pour M < 2 (modèle convergent) dans un système unidimensionnel en régime variable :

$$T_0^{t+1} = \frac{1}{M}(T_{n+1} + T_{n-1})^t + \left(1 - \frac{2}{M}\right)T_n^t \quad (49)$$

Avec cette équation, il est possible de déterminer la température dans la section n à l'instant t = (t+1) + θt, à partir des températures des sections (n+1), n et (n-1) à l'instant θ = tΔθ.

Annexe 6 Nomenclature et informations relatives à la localisation, à la précision et à la sensibilité des capteurs utilisés au cours de l'étude.

Nomenclature et informations sur les différents points de mesure					
Paramètre mesuré	**Intitulé du point de mesure**	**Localisation dans la cavité**	**Localisation dans la salle**	**Précision**	**Sensibilité**
Temp air	SAS 1 C1 A	SAS1 CI	Paroi Gauche	±0.3 °C	0.001 °C
	SAS 1 C2 A	SAS 1 C2	Paroi Gauche		
	SAS C3 Bas A	SAS 1 C3	Plafond stalactite		
	SAS 2 PG A	SAS 2	Paroi Gauche		
	ST GO A	ST	Gours		
	ST PG A	ST	Paroi Gauche		
	ST PD A	ST	Paroi Droite		
	ST V A	ST	Voûte		
	DA ENT A	DA	Entrée Paroi Gauche		
	DA RET A	DA	Rétrécissement Paroi Gauche		
	DA FOND A	DA	Fond Paroi Gauche		
	MEAN A	DA	Ombilic		
	PAS PG A	PAS	Paroi Gauche		
	PAS PD A	PAS	Paroi Droite		
	PAS SOL	PAS	Mât sol		
	PAS MILIEU	PAS	Mât Milieu		
	PAS VOUTE	PAS	Mât Voûte		
	ABS 5 cm	ABS	Mât sol		
	ABS 90 cm	ABS	Mât 90 cm		
	ABS 178 cm	ABS	Mât 178 cm		
	ABS 260 cm	ABS	Mât 260 cm		
	ABS 340 cm	ABS	Mât 340 cm		
	ABS PG A	ABS	Paroi Gauche		
	ABS PD A	ABS	Parois Droite		
	ABS PM A	ABS	Margelle du Puits		
	NEF BAS 1	NEF	Bas Paroi Gauche		
	MOND M A	GM	Paroi Droite		
	FELIN PUITS A	CF	Puits		
	FELIN FOND A	CF	Entrée de la Salle		
	PUITS A	PS	Paroi Gauche		
	DIA BAS A	BD	Eboulis		
	SALLES ENS A	SE	Sol		
	OMBILIC A	SE	Entrée Ombilic		
	DIAC HAUT A	HD	Paroi Gauche		
Temp roche	SRS 1 C1 R	SAS1 CI	Paroi Gauche		
	SRS 1 C2 R	SAS 1 C2	Paroi Gauche		
	SRS C3 BRs R	SAS 1 C3	Pladond stalactite		
	SRS 2 PG R	SAS 2	Paroi Gauche		
	ST GO R	ST	Gours		
	ST PG R	ST	Paroi Gauche		
	ST PD R	ST	Paroi Droite		
	ST V R	ST	Voûte		
	DA ENT R	DA	Entrée Paroi Gauche		
	DA RET R	DA	Rétrécissement Paroi Gauche		
	DA FOND R	DA	Fond Paroi Gauche		
	MEAN R	DA	Ombilic		
	PAS PG R	PAS	Paroi Gauche		
	PAS PD R	PAS	Paroi Droite		
	ABS PM R	ABS	Margelle du Puits		
	NEF BAS 1	NEF	Bas Paroi Gauche		
	MOND M R	GM	Paroi Droite		
	FELIN PUITS R	CF	Puits		
	FELIN FOND R	CF	Entrée de la Salle		
	PUITS R	PS	Paroi Gauche		
	DIA BAS R	BD	Eboulis		
CO2	SAS 1 C1 CO2	SAS 1 C1	Conduite Extraction	±0.2 % de la valeur	0.001%
	SAS 1 C3 CO2	SAS 1 C3	Bas 70 cm		
	ST CO2	ST	Gours 50 cm		
	DA CO2	DA	Fond 50 cm		
	PAS CO2	PAS	Banquette Droite 70 cm		
	NEF HAUT CO2	ABS	Bas Sol 30 cm		
	ABS Bas CO2	ABS	Mât 5 cm		
	ABS Milieu CO2	ABS	Mât 150 cm		
	ABS Haut CO2	ABS	Mât 250 cm		
	GM CO2	GM	Sol 30 cm		
	FELIN CO2	CF	Sol 30 cm		
	PUITS CO2	BD	Eboulis 30 cm		
	OMBILIC CO2	SE	Sol 5 cm		
	DIAC HAUT CO2	HD	Sol 30 cm		
O2	PUITS O2	BD	Eboulis 30 cm	±0.5 % de la valeur	0.01%
	DIAC HAUT O2	HD	Sol 30 cm		
Anémomètre	PUITS ANEMO	BD	Conduite Extraction	±1.5 % de la valeur	0.01 m.s-1
	CHEMINEE ANEMO	Extérieur	Conduite Extraction		
Pression Atmosphérique	PA INT	ABS	Gaine Froidevaux	±0.1 hPa	0.1 hPa
Débit SAS	NIV CITERNE	SAS 2	Cuve de récupération	±0.1 hPa	0.1 hPa

Annexe 7 : Protocole de surveillance des paramètres microclimatiques et des PCO_2 dans la cavité de Lascaux proposé suite à l'arrêt du pompage.

PROTOCOLE D'ARRET DE L'EXTRACTEUR DE LA CAVITE DE LASCAUX

19/11/2014

Laboratoire I2M-GCE (Université de Bordeaux) Bâtiment B18 PAC Talence Allée Geoffroy Saint Hilaire CS 50023 33615 Pessac

Historique de l'extraction de l'air de la grotte

L'extraction de l'air à l'éboulis du Puits du Sorcier a été mise en place le **18 Octobre 1966**. La décision a été prise par la commission scientifique après la première crise à la fin des années 50. La question posée à l'époque aux différents scientifiques était de **déterminer s'il était important de maitriser les taux de dioxyde de carbone et d'humidité dans la cavité et si oui, quel protocole mettre en place**. Dans son rapport de 1965, le Professeur Schoëller (1965) **propose deux solutions différentes :**

- **Supprimer complétement les suintements de l'eau dans la grotte** ce qui impose de maitriser l'hygrométrie de la cavité pour empêcher une condensation trop importante, **mais aussi de supprimer totalement les arrivées de dioxyde de carbone** ;
- **Laisser les suintements dans la cavité** ce qui nécessite de **ne pas abaisser le taux de dioxyde de carbone naturel dans l'air de la cavité**, de maitriser le taux d'humidité de la cavité pour éviter l'évaporation des eaux d'écoulement et donc la **précipitation de calcite sur les parois**

La commission scientifique opta pour **l'installation de la machinerie (maitrise de l'humidité) et de l'extracteur d'air (diminution du taux de CO_2)**. Les raisons de l'installation de l'extracteur d'air ne nous sont pas connues. L'extraction fut d'abord effective dans différentes parties de la cavité (Salle des Taureaux, Galerie Mondmilch, *etc.*) avant d'être cantonnée à l'éboulis du Puits du Sorcier (Cf. Figure 1).

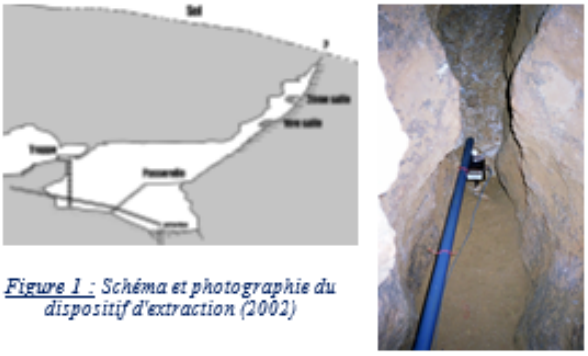


Figure 1 : Schéma et photographie du dispositif d'extraction (2002)

Contexte de l'arrêt de l'extracteur

Ce dispositif d'extraction a depuis été modernisé plusieurs fois. Cependant, **aucune étude n'a permis à ce jour de déterminer son impact réel sur l'aérologie de la cavité de Lascaux**. Nous rappelons que le pompage n'est pas pris en compte pour le moment dans le simulateur de la grotte de Lascaux.

C'est pourquoi, il a été demandé au laboratoire I2M GCE de **déterminer les effets du pompage sur l'équilibre physico-chimique des eaux aux parois**. Pour répondre à cette question, **il faut déterminer l'impact du pompage sur l'aérologie de la grotte et donc sur les mouvements de dioxyde de carbone en conditions naturelles**, c'est-à-dire sans extraction. C'est pour cela que nous demandons cet **arrêt prolongé de l'extraction**.

Protocole d'arrêt de l'extracteur

Nous proposons un protocole à mettre en place pour l'arrêt de l'extracteur. Suite aux nouvelles informations apportées par l'étude généralisée des taux de dioxyde de carbone dans la cavité, il est apparu que **cinq masses d'air différentes sont présentes dans la cavité** (Salle des Taureaux, Diverticule Axial, Passage, Abside, Nef/Galerie Mondmilch/Cabinet des Félins). Du mois de Février au mois de Novembre, elles **s'homogénéisent en entrainant une augmentation du taux de dioxyde de carbone de la Salle des Taureaux et une diminution dans les autres parties de la cavité**. Ces phénomènes n'atteignent pas la masse d'air de la Nef/Galerie Mondmilch/Cabinet des Félins qui reste indépendante. Il serait donc intéressant de pouvoir vérifier si ces phénomènes sont **naturels ou influencés par le pompage**.

Il est donc nécessaire **de couper l'extracteur au plus tôt pour permettre une remise à l'équilibre des différents paramètres (températures, pCO_2) avant l'occurrence des convections (Février), mais aussi de poursuivre l'expérimentation jusqu'à l'arrêt de ces convections (Novembre)**.

Nous proposons donc d'arrêter l'extracteur **tout au long de l'année 2015 et non sur plusieurs périodes courtes**. En effet, comment être sûr que les coupures précédentes n'influencent plus les paramètres aérologiques ? De plus, il semble plus perturbateur pour la cavité de changer les paramètres aérologiques plusieurs fois au cours de l'année.

En parallèle de l'analyse des mesures de dioxyde de carbone dans la cavité il est prévu de **prélever des échantillons de gaz avant et après l'arrêt du pompage pour déterminer si celui-ci a un effet sur les échanges d'air entre l'extérieur et le massif** (variation de la composition isotopique du dioxyde de carbone des différentes masses d'air de la cavité).

Remarque : pour s'affranchir des communications avec l'atmosphère, le tuyau de l'extracteur sera bouché à ses deux extrémités.

Les phénomènes hydro-climatologiques à surveiller au cours de l'arrêt de l'extracteur

Il est fort probable que **plusieurs paramètres hydro-climatologiques varient au cours de l'arrêt de l'extracteur**. En effet, les taux de dioxyde de carbone ayant augmenté dans la cavité au cours des épisodes passés d'arrêt de l'extracteur, il est prévu que ces taux augmentent à nouveau au cours de l'arrêt de l'extraction. Il est à noter que les taux de dioxyde de carbone attendus dans la salle des taureaux ne devraient pas excéder ceux mesurés en haut de la Nef actuellement soit environ 1,5% à 2,5 %, ou encore ceux mesurés avant la mise en place de l'extracteur dans les années 60 (1% à 2,5%)..
S'ajoute à cela le fait que les températures mesurées dans l'éboulis du puits du sorcier sont supérieures à celles mesurées dans les parties ornées. Il se pourrait donc que l'arrêt de l'extraction entraine un mouvement d'air légèrement plus chaud vers les autres parties de la cavité.

Il faudra donc contrôler régulièrement les écarts de température air/roche pour éviter la **condensation.**
En effet, cette eau de condensation pourrait être **plus agressive du fait de l'augmentation des taux de dioxyde de carbone dans l'air de la cavité**. A travers l'analyse des arrêts brefs de l'extracteur, il apparait **que l'augmentation des températures n'est pas mise en évidence dans les parties ornées de la cavité**. Il sera tout de même important de surveiller les augmentations de dioxyde de carbone mais surtout la possible augmentation des températures de l'air de la partie ornée de la cavité. **Une surveillance accrue de ces paramètres sera réalisée au cours de la phase de mise à l'équilibre des paramètres hydro-climatologiques de la cavité.**

Protocole de suivi des paramètres hydro-climatologiques à surveiller

Un **protocole de suivi des paramètres hydro-climatologiques dans les différentes parties de la cavité** sera mis en place pour déceler les possibles perturbations pouvant affecter l'état de la cavité. Pour cela, nous proposons de **nous appuyer sur le protocole déjà utilisé par les conservateurs pour décider de la mise en marche de la machinerie**. Cette action ayant pour but de créer des convections dans la Salle des Taureaux et ainsi diminuer le moteur principal de la condensation qu'est l'écart de températures entre l'air et la roche.

1) Nous nous appuierons donc en premier lieu **sur le suivi hebdomadaire des témoins de condensations présents dans les différentes salles de la cavité, mais aussi sur le suivi hebdomadaire de l'état hydrique des parois de la cavité et de l'activité des vermiculations dans les zones sensibles de la cavité**. Ces relevés sont effectués par les agents de la cavité.
2) En parallèle, nous proposons de **suivre de façon journalière deux paramètres d'intérêt que sont le dioxyde de carbone et la température.** Ce suivi sera effectué par un membre de l'équipe du laboratoire I2M GCE depuis l'Université de Bordeaux. Il se concentrera sur **les mesures de pCO_2 dans les différentes parties de la cavité mais surtout sur les écarts de température entre l'air et la roche** aux différents points de mesure disponibles.

Ces points de mesure sont les suivants :

- **Salle des taureaux :** gours, parois gauche et droite et voute ;
- **Diverticule axial :** entrée, rétrécissement et fond ;
- **Passage :** sol, milieu, parois droite et gauche, et voute ;
- **Abside :** mât de mesure et margelle au niveau du puits ;
- **Nef :** bas de la nef ;
- **Galerie Mondmilch :** milieu ;
- **Cabinet des félins :** fond et puits ;
- **Grande diaclase :** scène du puits, haut et bas de la diaclase.

Ces suivis des écarts de température et des conditions hydriques de la cavité ont pour objectif de **prévenir les phénomènes de condensation trop importants**. Nous considérerons que le pompage doit être remis en marche **si les écarts de température air/roche liés exclusivement à l'arrêt de l'extracteur sont supérieurs pendant plus d'une semaine à 0,05°C au niveau du champ orné de la cavité**.
Remarque : les écarts dus à l'entrée de personnes dans la cavité ou encore à des phénomènes naturels connus ne seront pas considérés.

Autre(s) phénomène(s) à surveiller au cours de l'arrêt de l'extraction

Un ou d'autres phénomènes se situant hors du champ de compétences de l'équipe de recherche du laboratoire I2M GCE doivent être surveillés. En effet, il parait important de poser la question de **l'influence des augmentations de dioxyde de carbone mais aussi de la possible modification des mouvements d'air sur la population microbienne des différentes parties de la cavité**.

Annexe 8 : Visualisation des résultats des simulations 3D des vitesses d'écoulement d'air dans la cavité de Lascaux montrant les régimes aérologiques de stratification (11/02/2013) et de thermoconvections (31/05/2013) dans les zones axiale, droite et la Grande Diaclase de la Grotte Lascaux.

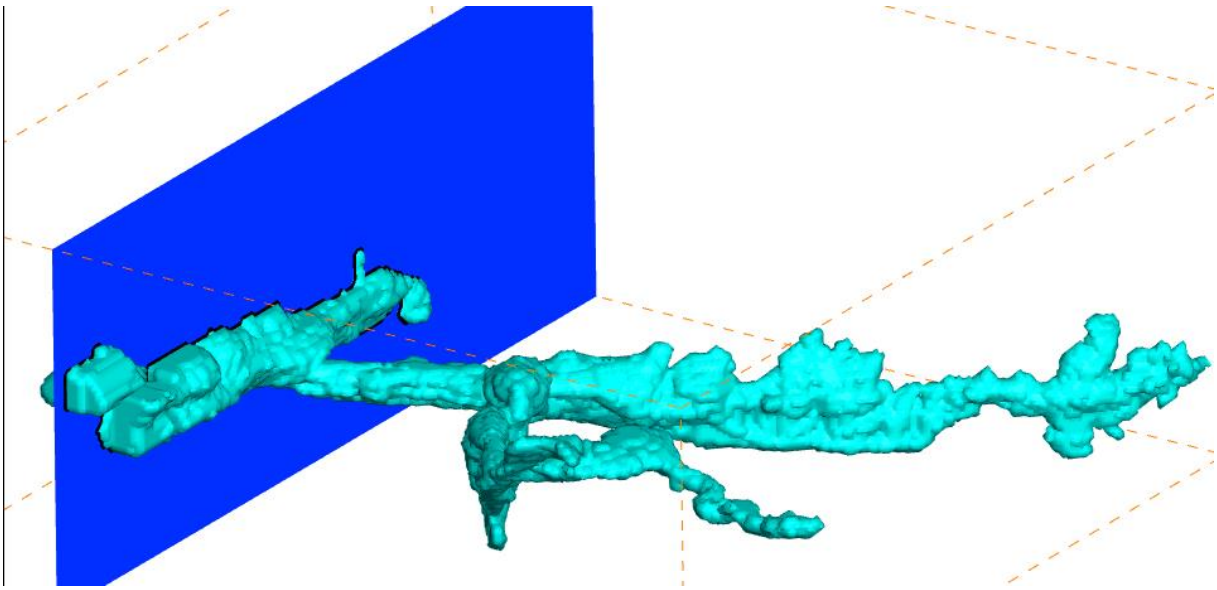


Figure-A-2 : Localisation de la coupe longitudinale de la zone axiale utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013.

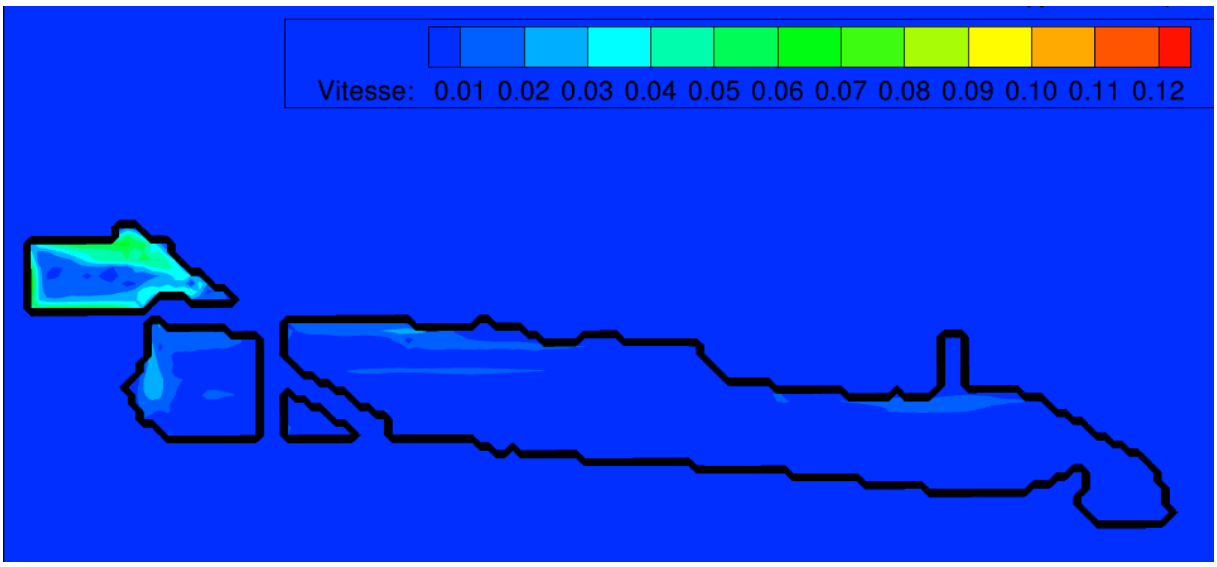


Figure-A-3 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone axiale de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, le SAS1, la Salle des Machines, le SAS2, la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial.

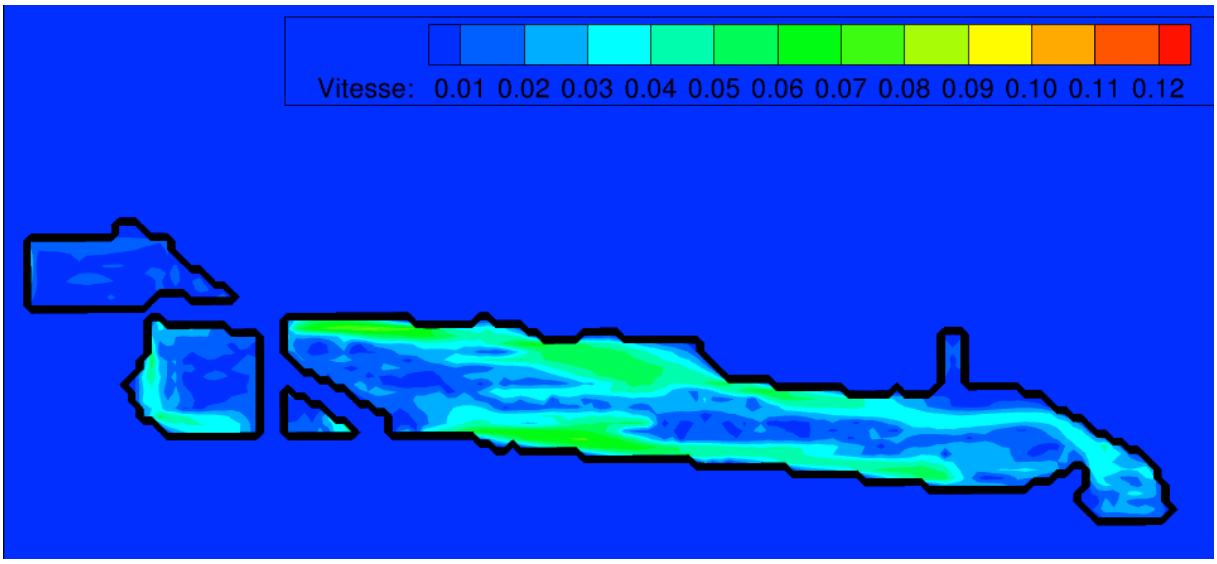


Figure-A-4 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone axiale de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, le SAS1, la Salle des Machines, le SAS2, la Salle des Taureaux et le Diverticule Axial.

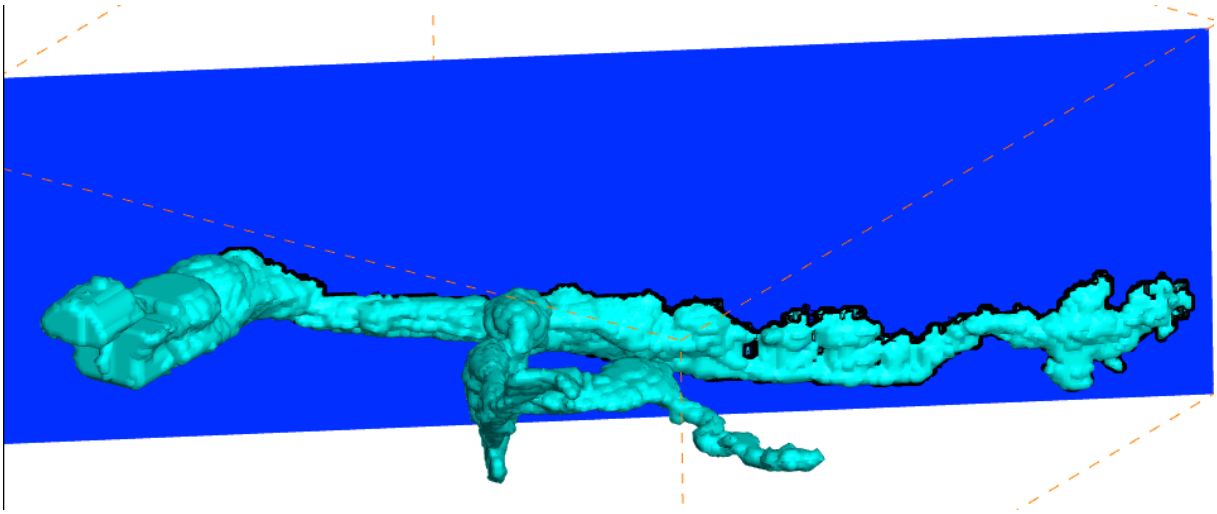


Figure-A-5 : Localisation de la coupe longitudinale de la zone droite utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013.

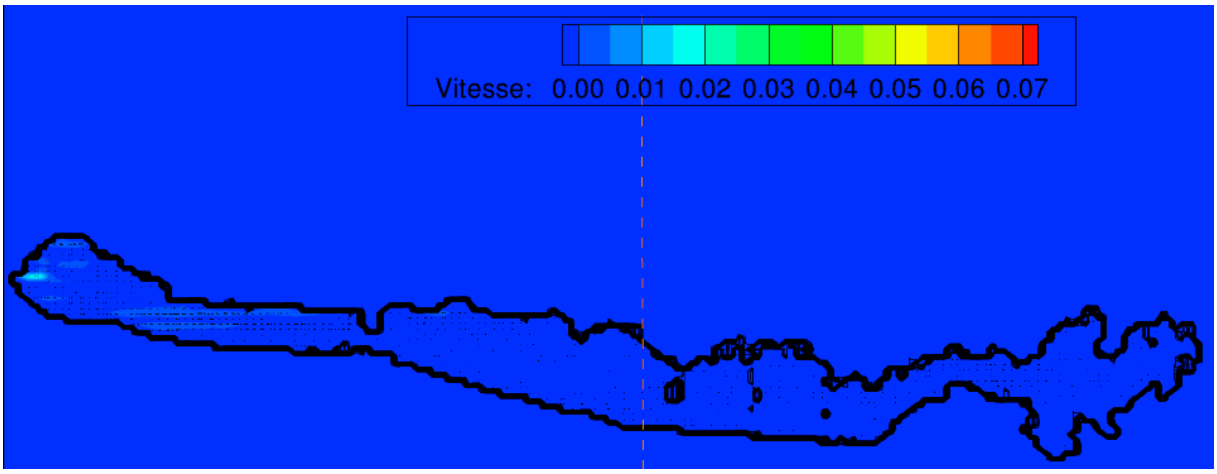


Figure-A-6 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone droite de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, la Salle des Taureaux, le Passage, l'Abside, la Nef, la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins.

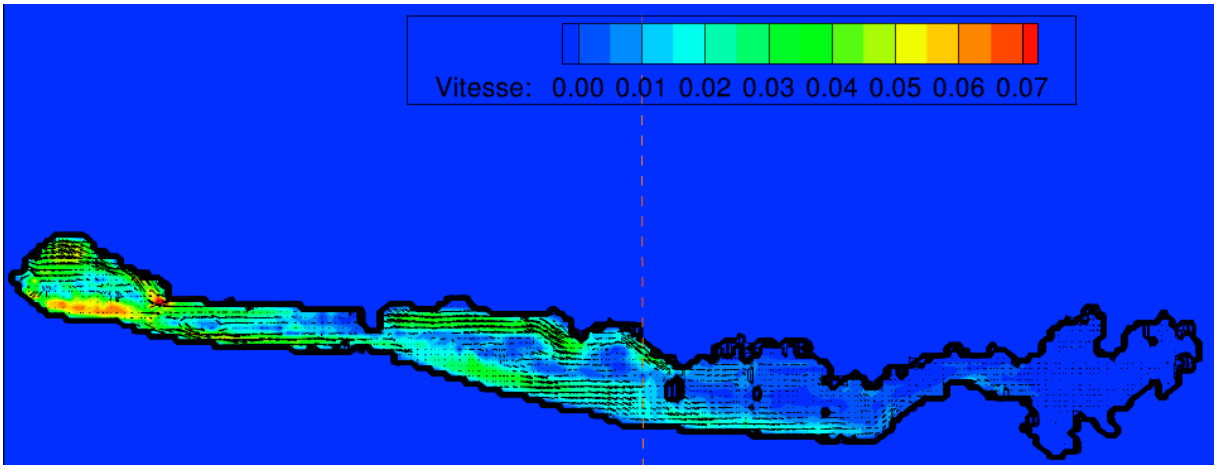


Figure-A-7 : Vitesses des écoulements d'air dans la zone droite de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, la Salle des Taureaux, le Passage, l'Abside, la Nef, la Galerie Mondmilch et le Cabinet des Félins.

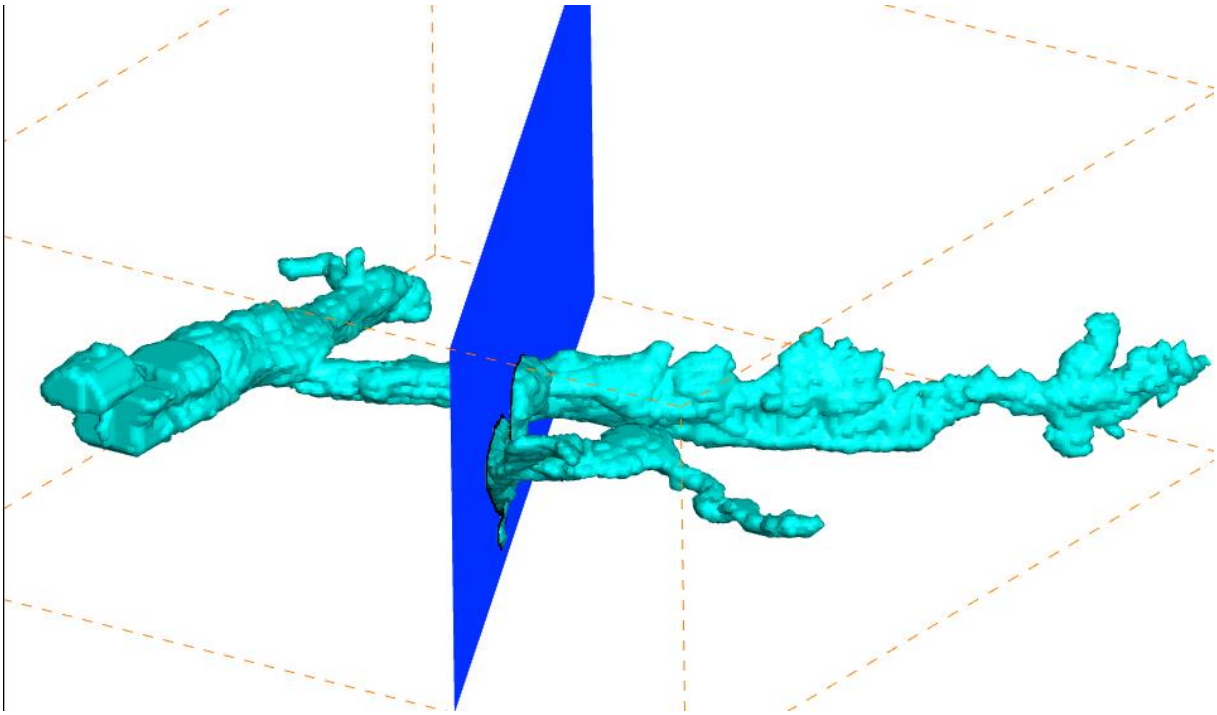


Figure-A-8 : Localisation de la coupe longitudinale de la Grande Diaclase utilisée pour la présentation des résultats des simulations 3D des écoulements d'air siégeant dans la Grotte de Lascaux les 11/02/2013 et 31/05/2013.

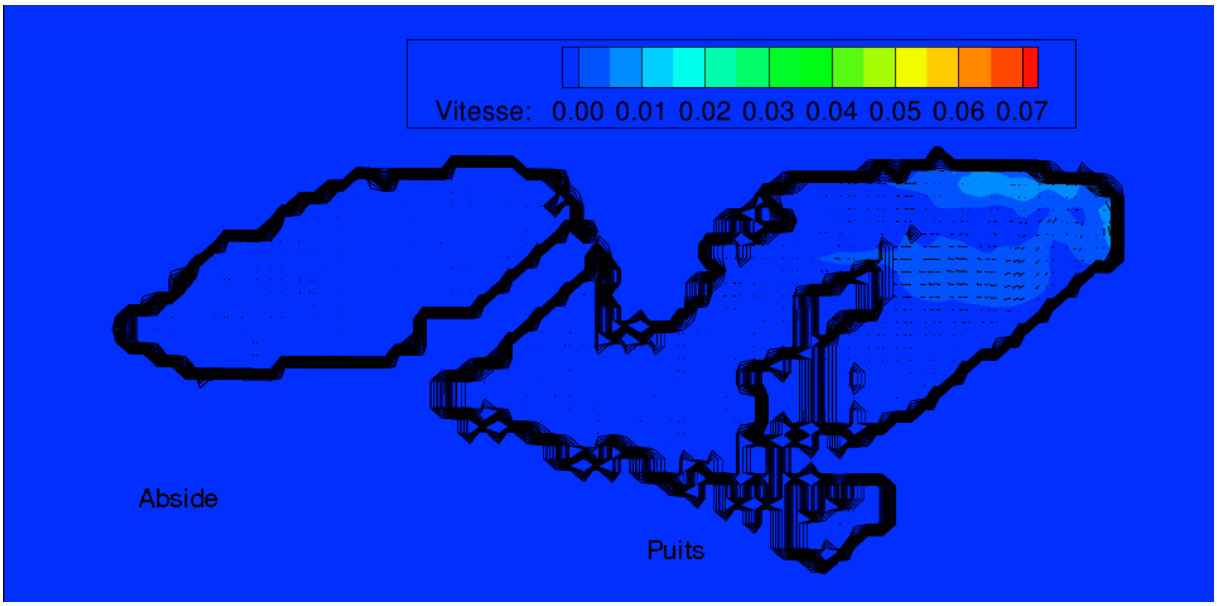


Figure-A-9 : Vitesses des écoulements d'air dans la Grande Diaclase de la Grotte de Lascaux au 11/02/2013 (stratification de l'air). Sont visibles de gauche à droite, l'Abside, le Puits du Sorcier, l'éboulis du Bas de la Diaclase, le Haut de la Diaclase et les Salles Ensablées.

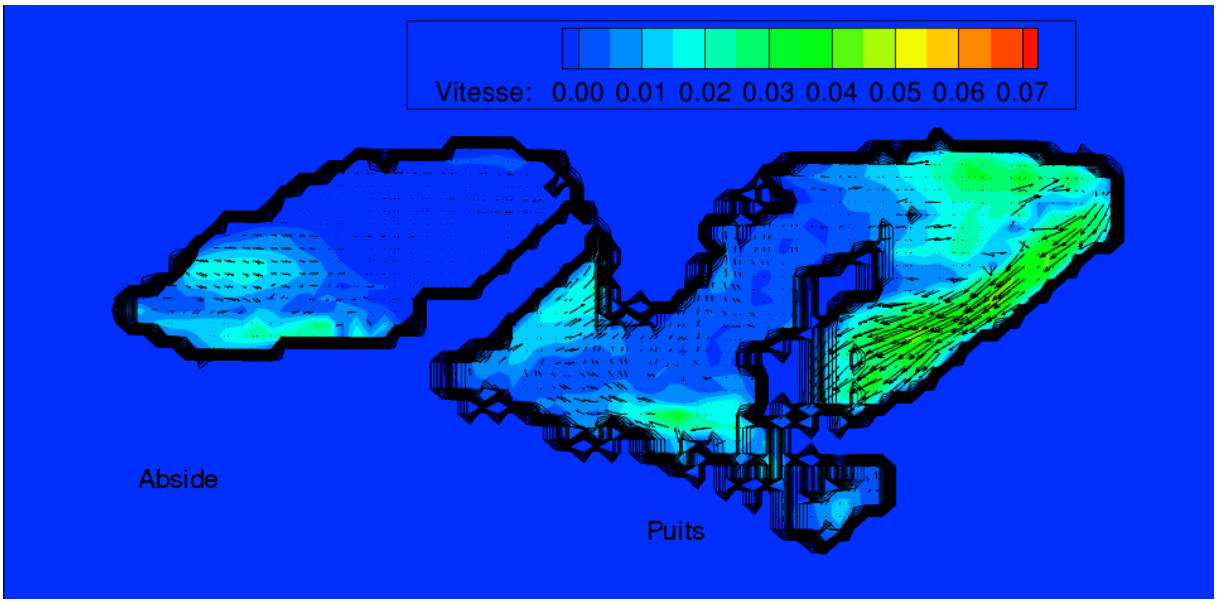


Figure-A-10 : Vitesses des écoulements d'air dans la Grande Diaclase de la Grotte de Lascaux au 31/05/2013 (thermoconvections). Sont visibles de gauche à droite, l'Abside, le Puits du Sorcier, l'éboulis du Bas de la Diaclase, le Haut de la Diaclase et les Salles Ensablées.

Annexe 9 : Récapitulatif des données hydrochimiques et isotopiques obtenues après les analyses des pluies, eaux du sol, émergence épikarstique et source de la Haute Fageotte.

Tableau-A- 1: Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs dans les eaux de pluie prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016.

Date	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^{+} ($mg.L^{-1}$)	K^{+} ($mg.L^{-1}$)	NH_4^{+} ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^{-} ($mg.L^{-1}$)	NO_3^{-} ($mg.L^{-1}$)	F^{-} ($mg.L^{-1}$)
21/10/2013	0.66	0.08	0.72	0.51	0.25	0.55	0.55	1.41	0.01
28/10/2013	7.47	0.36	0.67	0.28	0.52	1.26	1.34	2.71	0.01
04/11/2013	0.97	0.11	0.76	0.24	0.07	0.54	1.24	0.41	0.01
13/11/2013	0.56	0.14	1.06	0.27	0.12	0.44	1.68	0.46	0.00
18/11/2013	5.45	0.23	1.64	0.36	0.93	0.69	2.51	0.90	0.01
25/11/2013	0.43	0.12	0.68	0.22	0.17	0.51	1.49	0.64	0.00
02/12/2013	1.42	0.17	1.14	0.87	1.03	0.81	1.00	1.82	0.00
16/12/2013	0.71	0.14	0.63	0.29	0.38	1.33	0.73	1.33	0.00
24/12/2013	0.61	0.09	0.56	0.58	0.05	0.90	0.76	0.95	0.00
30/12/2013	5.52	0.10	0.74	0.25	0.13	1.41	1.03	0.33	0.00
06/01/2014	0.76	0.17	1.15	0.26	0.16	1.05	1.63	0.39	0.00
13/01/2014	1.03	0.15	1.03	0.93	0.47	0.98	0.75	0.63	0.00
20/01/2014	1.54	0.09	0.37	0.14	0.22	0.55	0.36	0.35	0.01
27/01/2014	0.43	0.11	0.69	0.17	0.11	0.50	1.00	0.29	0.01
03/02/2014	1.69	0.12	0.89	0.27	0.12	0.54	1.04	0.21	0.00
10/02/2014	6.42	0.37	2.78	0.29	0.27	1.32	4.56	0.33	0.01
17/02/2014	0.72	0.23	1.44	0.17	0.19	0.61	2.21	0.36	0.00
24/02/2014	5.59	0.44	1.47	0.17	0.19	0.75	2.23	0.34	0.01
03/03/2014	2.96	0.29	1.99	0.25	0.23	0.57	3.30	0.27	0.04
10/03/2014	0.86	0.41	2.69	0.18	0.12	0.69	4.55	0.13	0.00
24/03/2014	2.71	0.20	1.20	0.26	0.98	2.72	1.93	2.13	0.01
31/03/2014	0.60	0.25	1.48	0.18	0.19	0.82	1.97	1.30	0.00
08/04/2014	7.21	0.53	1.28	0.59	0.63	0.45	2.38	0.28	0.00
22/04/2014	2.61	0.31	0.32	2.16	2.33	1.36	0.76	1.83	0.09
28/04/2014	1.61	0.24	1.30	0.84	1.04	0.69	2.08	0.77	0.03

Date	Ca^{2+} (mg.L^{-1})	Mg^{2+} (mg.L^{-1})	Na^{+} (mg.L^{-1})	K^{+} (mg.L^{-1})	NH_4^{+} (mg.L^{-1})	SO_4^{2-} (mg.L^{-1})	Cl^{-} (mg.L^{-1})	NO_3^{-} (mg.L^{-1})	F^{-} (mg.L^{-1})
05/05/2014	1.19	0.18	0.65	0.55	0.87	0.41	0.85	0.26	0.03
20/05/2014	5.57	0.26	2.59	1.34	0.59	1.07	4.07	0.40	0.12
26/05/2014	2.11	0.16	0.92	0.84	0.43	0.54	0.45	0.71	0.02
02/06/2014	0.83	0.08	0.65	0.72	0.69	0.29	0.50	0.23	0.04
11/06/2014	2.33	0.18	0.79	0.47	1.19	1.13	1.11	1.22	0.09
24/06/2014	1.74	0.13	0.44	0.43	0.56	0.82	0.21	0.92	0.00
30/06/2014	0.77	0.06	0.52	0.26	0.48	0.87	0.41	0.67	0.01
07/07/2014	4.16	0.24	0.94	0.59	1.27	2.04	1.12	1.93	0.01
15/07/2014	2.50	0.21	0.91	1.18	3.83	1.78	0.95	1.03	0.05
21/07/2014	3.07	0.07	0.47	0.34	0.42	0.64	0.28	0.45	0.00
04/08/2014	0.79	0.09	0.14	0.14	0.04	0.45	0.25	0.63	0.03
11/08/2014	1.36	0.15	0.69	0.45	0.38	1.20	0.81	1.29	0.00
18/08/2014	0.68	0.09	0.62	0.39	0.09	0.34	0.77	1.21	0.00
01/09/2014	2.64	0.07	0.25	0.21	0.05	0.31	0.39	0.49	0.00
16/09/2014	1.55	0.17	0.41	1.12	0.97	0.67	0.66	4.50	0.00
24/09/2014	1.20	0.10	0.34	0.43	0.11	0.52	0.42	3.08	0.01
29/09/2014	0.69	0.05	0.19	0.30	0.09	0.37	0.13	2.53	0.00
06/10/2014	1.07	0.08	0.30	0.65	0.47	0.60	0.36	3.06	0.00
20/10/2014	1.52	0.08	0.55	0.54	0.21	0.14	0.47	0.35	0.00
03/11/2014	1.41	0.15	0.82	1.15	0.48	0.96	1.38	5.64	0.01
12/11/2014	1.16	0.15	1.15	0.40	0.09	0.33	1.78	0.48	0.00
17/11/2014	0.73	0.17	0.96	0.28	0.08	0.16	0.55	0.21	0.00
24/11/2014	1.05	0.25	1.83	0.77	0.19	0.44	1.56	0.46	0.00
01/12/2014	1.35	0.23	0.68	0.49	0.07	0.54	0.54	0.71	0.01
08/12/2014	2.09	0.34	0.59	0.28	0.24	1.06	1.25	4.26	0.00
15/12/2014	1.63	0.28	2.04	0.34	0.11	0.23	0.84	0.10	0.00
08/01/2015	0.99	0.19	0.94	0.22	0.07	0.19	0.57	0.36	0.00

Date	Ca^{2+} (mg.L^{-1})	Mg^{2+} (mg.L^{-1})	Na^{+} (mg.L^{-1})	K^{+} (mg.L^{-1})	NH_4^{+} (mg.L^{-1})	SO_4^{2-} (mg.L^{-1})	Cl^{-} (mg.L^{-1})	NO_3^{-} (mg.L^{-1})	F^{-} (mg.L^{-1})
12/01/2015	1.68	0.24	1.79	1.28	0.26	0.63	0.80	1.34	0.00
19/01/2015	0.85	0.20	0.85	0.23	0.28	0.62	1.60	1.96	0.00
27/01/2015	0.94	0.22	0.73	0.31	0.37	1.17	1.18	3.68	0.00
03/02/2015	0.60	0.16	1.33	0.17	0.09	0.45	2.16	0.33	0.00
16/02/2015	0.35	0.12	0.97	0.16	0.19	0.42	1.48	0.46	0.00
23/02/2015	0.73	0.11	0.31	0.15	0.17	0.26	0.35	0.51	0.00
02/03/2015	0.63	0.16	0.88	0.13	0.12	0.12	0.52	0.08	0.00
09/03/2015	1.16	0.33	1.13	0.14	0.24	0.47	2.25	1.05	0.00
16/03/2015	1.72	0.56	2.11	0.50	1.40	1.79	4.25	6.26	0.00
24/03/2015	4.72	0.55	1.17	0.43	0.64	3.97	1.72	5.82	0.01
30/03/2015	2.38	0.19	0.76	0.11	0.16	1.01	0.64	3.72	0.00
07/04/2015	1.94	0.14	0.78	0.20	0.01	0.60	0.26	2.15	0.00
21/04/2015	2.06	0.18	0.30	0.43	0.36	0.48	0.43	1.08	0.00
28/04/2015	1.17	0.10	0.14	0.42	0.59	0.67	1.36	1.53	0.00
04/05/2015	0.97	0.09	0.11	0.34	0.19	0.57	1.42	2.17	0.00
11/05/2015	0.95	0.14	1.32	1.08	0.32	1.48	1.59	3.92	0.01
19/05/2015	0.94	0.20	2.54	1.82	0.46	1.27	4.82	3.53	0.00
01/06/2015	1.19	0.16	1.38	1.13	0.57	4.18	10.87	41.79	0.01
15/06/2015	1.44	0.11	0.23	0.44	0.69	0.66	0.30	1.44	0.00
03/08/2015	3.74	0.52	1.41	4.31	3.07	4.25	2.32	3.73	0.03
11/08/2015	1.38	0.10	0.26	0.24	0.03	0.72	0.17	4.93	0.01
17/08/2015	1.26	0.06	0.53	0.40	0.08	0.41	0.44	0.49	0.00
25/08/2015	1.23	0.14	1.26	0.47	0.50	1.06	1.83	3.16	0.04
01/09/2015	1.47	0.09	0.50	0.27	0.54	0.67	0.45	3.29	0.01
14/09/2015	1.18	0.14	0.37	0.12	0.15	0.61	2.75	1.71	0.01
22/09/2015	1.62	0.27	2.32	0.15	0.42	0.56	5.04	0.12	0.00
28/09/2015	1.03	0.22	2.22	0.21	0.81	0.73	3.33	2.14	0.00

Date	Ca^{2+} (mg.L^{-1})	Mg^{2+} (mg.L^{-1})	Na^{+} (mg.L^{-1})	K^{+} (mg.L^{-1})	NH_4^{+} (mg.L^{-1})	SO_4^{2-} (mg.L^{-1})	Cl^{-} (mg.L^{-1})	NO_3^{-} (mg.L^{-1})	F^{-} (mg.L^{-1})
06/10/2015	0.64	0.13	0.38	0.38	0.32	0.56	0.44	1.74	0.00
13/10/2015	2.29	0.68	6.06	1.29	0.87	0.65	2.20	11.74	0.01
26/10/2015	1.46	0.41	1.91	1.14	0.76	0.27	0.83	0.56	0.16
02/11/2015	0.50	0.07	0.17	0.10	0.06	0.40	0.99	2.72	0.00
09/11/2015	8.84	0.63	0.85	0.36	0.11	0.20	0.70	0.56	0.00
16/11/2015	17.19	1.20	1.53	0.62	0.17	0.21	1.24	0.67	0.00
23/11/2015	0.56	0.08	0.47	0.41	0.16	0.49	2.57	5.56	0.00
30/11/2015	0.65	0.10	0.73	0.28	0.25	0.33	2.39	1.07	0.00
22/12/2015	2.22	0.36	1.67	0.42	0.64	0.32	2.87	0.29	0.00
06/01/2016	0.58	0.19	1.34	0.22	0.23	0.28	2.28	0.23	0.00
12/01/2016	0.40	0.23	1.48	0.19	0.13	0.32	0.87	0.82	0.00
20/01/2016	0.41	0.24	1.34	0.26	0.22	0.73	1.50	1.14	0.02
26/01/2016	0.85	0.17	0.59	0.60	0.26	0.65	2.97	0.63	0.00
02/02/2016	1.05	0.27	0.54	0.20	0.96	0.45	1.74	3.29	0.00
10/02/2016	1.08	0.33	1.36	0.21	0.67	0.38	2.23	3.09	0.00
16/02/2016	1.11	0.40	2.17	0.22	0.39	0.32	1.91	0.75	0.00
22/02/2016	1.10	0.37	1.38	0.69	1.17	0.42	2.66	0.88	0.00
25/02/2016	0.91	0.40	1.06	0.34	1.15	0.25	0.54	2.11	0.00
29/02/2016	9.83	0.63	1.62	0.34	1.39	0.36	1.44	1.75	0.00
07/03/2016	1.60	0.32	1.17	0.34	0.83	0.33	0.42	0.99	0.00
15/03/2016	6.34	0.65	1.93	0.64	1.34	0.32	0.79	0.79	0.00
22/03/2016	7.80	0.37	0.92	0.76	1.41	0.25	0.22	0.62	0.00
29/03/2016	14.32	0.39	1.54	0.93	2.18	0.32	0.73	1.27	0.00
04/04/2016	1.97	0.17	4.10	1.38	1.55	0.33	1.33	1.05	0.00
12/04/2016	6.51	0.20	0.59	0.41	1.27	0.41	0.85	1.34	0.00
22/04/2016						0.25	0.22	0.62	0.00
28/04/2016						0.32	0.73	1.27	0.00

Date	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^{+} ($mg.L^{-1}$)	K^{+} ($mg.L^{-1}$)	NH_4^{+} ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^{-} ($mg.L^{-1}$)	NO_3^{-} ($mg.L^{-1}$)	F^{-} ($mg.L^{-1}$)
02/05/2016						0.33	1.33	1.05	0.00
17/05/2016						0.41	0.85	1.34	0.00
23/05/2016						0.34	1.04	1.17	0.00
31/05/2016						0.54	0.68	2.25	0.00
07/06/2016						0.36	0.47	2.85	0.00

Tableau-A- 2 : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux du sol prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016.

Date	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	HCO_3^{-} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^{+} ($mg.L^{-1}$)	K^{+} ($mg.L^{-1}$)	NH_4^{+} ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^{-} ($mg.L^{-1}$)	NO_3^{-} ($mg.L^{-1}$)	F^{-} ($mg.L^{-1}$)	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
08/01/2014	38.46	123.22	0.65	4.83	4.71	2.03	2.85	16.06	0.50	0.03	6.78	14.02
27/01/2014	40.89	117.00	0.64	4.66	1.85	1.58	2.45	10.69	5.04	0.03	7.86	12.75
26/02/2014	48.22	127.00	0.76	4.22	0.73	0.14	2.35	10.02	11.03	0.03		11.40
06/03/2014	44.79	125.12	0.62	4.06	1.48	0.40	2.17	10.13	9.09	0.03		9.36
27/03/2014	39.29	92.50	0.63	4.10	0.59	0.07	2.41	9.11	25.08	0.03		14.21
26/06/2014	47.97	135.00	1.15	5.45	3.62	0.34	3.26	11.17	63.86	0.08	7.63	17.54
22/07/2014	13.45	145.00	0.86	3.13	4.90	0.68	0.86	2.66	4.40	0.14	3.84	20.54
18/09/2014	43.52	124.37	1.00	2.19	3.66	0.35	0.43	3.07	3.71	0.08	2.07	14.65
21/11/2014	20.97	115.30	1.66	4.53	5.86	1.10	0.31	2.54	2.38	0.11	4.91	32.86
23/01/2015	56.86	135.20	1.45	7.80	2.41	0.39	1.13	8.66	5.27	0.09	7.44	21.16
30/01/2015	26.60	127.00	0.89	3.96	1.26	0.23	1.40	6.07	1.48	0.06	5.87	18.76
24/02/2015	45.06	125.12	0.88	5.00	0.62	0.15	1.20	6.17	1.46	0.03	7.29	14.16
02/03/2015	49.51	92.50	0.90	5.02	0.56	0.10	1.32	5.67	1.21	0.04	8.26	11.50
02/04/2015	33.57	85.60	0.66	4.89	0.83	0.16	1.00	5.47	5.31	0.11	8.11	18.48
28/05/2015	37.38	91.50	1.44	6.63	2.75	0.25	1.53	7.70	8.49	0.10	4.82	36.76
17/06/2015	28.79	81.20	1.56	4.77	10.39	0.95	1.29	8.76	2.18	0.09	3.91	39.00

01/09/2015	33.30	86.20	1.15	5.27	3.20	0.56	0.61	11.36	0.24	0.11	9.15	37.75
17/11/2015	17.69	112.60	0.61	2.97	1.38	0.53	0.27	9.49	2.35	0.16	6.34	19.74
14/12/2015	23.55	126.50	0.70	3.57	1.12	0.50	0.35	8.33	1.66	0.12	7.74	17.86
12/01/2016	32.10	140.30	0.87	5.01	0.41	0.48	0.43	7.17	0.96	0.08	8.37	19.70
20/01/2016	23.94	130.50	0.56	5.03	0.85	0.45	0.52	8.78	0.16	0.15	4.32	23.13
27/01/2016	42.96	127.60	0.46	4.90	0.22	0.42	0.30	8.82	0.15	0.09	7.86	17.89
09/02/2016	38.10	108.37	0.87	5.71	0.41	0.39	0.59	7.78	0.16	0.15	7.57	26.09
23/02/2016	30.82	102.60	0.66	5.40	0.57	0.36	0.63	10.50	0.27	0.11	7.05	22.44
25/03/2016	23.66	105.00	0.62	4.57	0.95	0.34	0.60	13.14	0.61	0.15	6.71	18.56
14/04/2016	32.14	12.90	0.71	4.74	0.60	0.54	0.51	7.61	1.74	0.05	6.52	16.56
09/06/2016							0.58	1.68	0.76	0.11	9.61	14.90

Tableau-A- 3 : : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux de la Haute Fageottel prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016.

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
23/10/2013	356.00	124.85	1.26	5.62	1.76	9.07	9.19	12.05	0.03	-2%	13.19	0.10
30/10/2013	400.16	124.71	1.28	5.63	1.81	8.52	9.24	12.94	0.04	4%	13.25	0.88
13/11/2013	325.74	122.58	1.34	5.77	2.29	5.87	8.38	9.44	0.03	4%	12.26	0.99
28/11/2013	318.42	125.38	1.27	6.08	2.31	6.98	8.96	9.59	0.05	2%	12.41	0.83
05/12/2013	416.02	127.06	1.22	5.53	1.78	6.90	11.00	10.55	0.03	1%	12.75	1.01
17/12/2013	401.38	125.64	1.24	5.84	2.11	8.39	8.80	17.06	0.05	4%	12.70	1.63
08/01/2014	351.36	120.70	1.18	4.87	1.15	7.07	8.10	7.46	0.03	-1%	11.13	1.43
16/01/2014	366.00	122.00	1.23	5.29	1.38	7.78	8.56	10.25	0.03	0%	11.89	1.15
27/01/2014	412.36	123.22	1.07	4.71	0.76	6.53	7.16	3.30	0.03	2%	9.71	2.68
29/01/2014	364.78	121.47	1.11	4.91	0.98	5.92	7.10	2.99	0.04	-1%	9.32	3.17
06/02/2014	369.66	122.70	1.18	4.89	1.09	6.73	7.54	4.96	0.03	0%	11.03	3.56
13/02/2014	375.76	123.34	1.59	5.05	1.14	6.86	7.27	5.35	0.05	0%	11.25	1.65
20/02/2014	375.76	121.97	1.18	5.08	1.05	7.98	7.51	6.76	0.03	1%	12.02	3.70

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
26/02/2014	367.22	129.11	1.21	5.21	1.23	8.06	7.94	7.65	0.05	-2%	12.40	2.04
06/03/2014	347.70	124.73	1.61	5.27	1.11	6.60	7.83	7.28	0.03	-4%	11.87	2.96
20/03/2014	376.00	133.85	1.25	5.76	1.44	8.04	8.29	9.27	0.03	-3%	13.51	0.93
27/03/2014	378.20	120.58	1.17	5.52	1.38	7.18	8.79	8.45	0.03	2%	13.22	0.86
04/04/2014	357.00	123.30	1.24	5.65	1.52	7.46	8.86	8.97	0.03	-2%	13.38	1.85
08/04/2014	406.26	119.70	1.18	5.63	1.26	7.47	8.67	9.18	0.03	3%	13.59	1.58
17/04/2014	401.38	119.96	1.16	5.90	1.87	7.54	9.47	9.33	0.03	4%	13.73	2.23
30/04/2014	367.22	130.69	1.21	5.68	1.27	7.75	9.10	9.93	0.03	-3%	13.90	1.06
05/06/2014	365.30	125.83	1.17	5.69	1.66	7.26	8.94	9.78	0.02	-1%	15.00	0.87
26/06/2014	364.78	121.94	1.07	5.06	1.02	7.36	9.28	9.94	0.06	1%	15.21	0.81
22/07/2014	366.00	130.96	1.25	6.10	1.51	8.10	9.53	10.00	0.05	-3%	14.92	0.91
18/09/2014	336.72	124.37	1.15	5.91	2.05	8.99	9.71	11.43	0.06	-4%	14.73	2.31
01/10/2014	340.38	120.65	1.17	5.81	1.40	5.50	8.42	10.58	0.05	-3%	14.32	1.65
06/11/2014	331.21	130.59	1.27	5.85	1.79	8.34	9.49	12.35	0.03	3%	15.09	1.45
21/11/2014	328.30	130.41	1.29	6.10	1.71	8.38	9.67	12.37	0.07	2%	15.38	0.07
15/12/2014	346.48	129.47	1.27	5.88	1.85	8.23	9.40	12.55	0.04	-5%	15.14	3.54
06/01/2015	341.30	128.41	1.20	6.35	2.56	8.23	13.55	12.78	0.03	-4%	14.28	1.37
13/01/2015	342.60	128.12	1.28	5.99	1.92	3.33	4.97	9.65	0.04	4%	14.76	0.91
23/01/2015	341.50	126.93	1.23	5.84	1.63	8.12	9.43	12.94	0.06	-4%	14.40	2.48
30/01/2015	325.74	122.96	1.15	5.05	1.34	7.23	8.88	9.30	0.04	1%	12.77	4.34
03/02/2015	330.30	124.56	1.19	5.25	1.45	7.38	8.88	9.45	0.04	1%	13.54	1.56
19/02/2015	327.30	125.06	1.23	5.47	1.75	7.59	8.87	10.93	0.03	2%	14.96	1.26
24/02/2015	326.40	122.76	1.15	4.92	1.24	6.87	8.77	7.99	0.04	3%	12.20	1.96
10/03/2015	326.20	125.48	1.23	5.11	1.33	7.55	8.26	8.73	0.04	4%	9.71	0.93
17/03/2015	355.66	126.31	1.23	5.20	1.36	7.67	8.27	9.73	0.04	4%	13.18	1.34
02/04/2015	363.56	127.82	1.24	5.40	1.45	7.99	8.67	10.54	0.04	-2%	14.35	3.98
15/04/2015	409.54	127.65	1.21	5.44	1.50	8.00	8.75	10.66	0.05	3%	14.86	2.75
22/04/2015	428.22	127.51	1.19	5.47	1.51	8.03	8.91	10.82	0.03	6%	15.23	1.67

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
30/04/2015	331.84	129.02	1.21	5.69	1.74	8.44	9.13	11.13	0.05	3%	15.55	1.66
04/05/2015	345.80	129.21	1.21	5.67	1.74	7.38	8.88	9.45	0.04	4%	10.63	1.86
12/05/2015	346.70	129.40	1.22	5.65	1.73	7.80	9.28	10.69	0.03	3%	13.54	1.79
28/05/2015	347.70	129.58	1.22	5.63	1.73	8.23	9.68	11.93	0.03	-4%	15.85	1.56
05/06/2015	357.46	124.83	1.18	5.69	2.03	7.83	9.00	11.71	0.03	-2%	15.65	1.28
17/06/2015	392.84	124.98	1.17	5.41	1.62	7.93	8.99	12.03	0.04	3%	14.12	1.61
07/07/2015	397.55	127.82	1.18	5.67	1.80	7.95	9.23	12.37	0.03	2%	14.40	1.61
01/09/2015	329.60	129.85	1.28	5.89	2.27	8.16	9.21	12.42	0.04	-4%	15.19	0.73
10/09/2015	366.00	137.29	1.30	6.18	2.35	8.46	9.12	15.79	0.04	-5%	15.36	0.65
16/09/2015	333.50	132.49	1.09	6.03	1.97	8.21	9.06	16.70	0.03	-5%	15.35	0.81
15/10/2015	350.14	130.36	1.26	5.97	2.01	7.96	9.00	17.61	0.03	-4%	15.56	0.81
21/10/2015	337.94	128.56	1.28	6.03	2.16	7.51	9.26	12.82	0.03	-4%	15.40	0.82
17/11/2015	333.52	125.42	1.10	5.90	2.02	4.92	13.45	10.39	0.03	-2%	17.12	1.09
14/12/2015	324.52	126.18	1.20	6.31	1.91	4.17	10.91	7.45	0.03	3%	17.30	1.53
22/12/2015	339.16	122.36	1.18	5.65	1.46	3.43	8.36	4.50	0.03	6%	10.71	1.82
01/12/2016	330.50	118.04	1.12	4.59	0.99	4.22	7.79	7.75	0.03	3%	14.80	1.92
20/01/2016	354.63	122.85	1.24	5.18	1.13	4.38	8.17	8.04	0.04	4%	14.94	3.72
27/01/2016	394.41	124.23	1.23	5.05	1.37	3.64	8.24	4.42	0.04	-2%	10.70	2.60
09/02/2016	346.82	121.56	1.15	5.21	0.70	1.98	8.32	4.09	0.08	3%	13.99	4.76
23/02/2016	365.60	125.64	1.25	4.70	1.15	4.93	8.68	9.98	0.05	6%	14.78	3.89
25/03/2016	430.66	144.49	1.29	5.26	1.25	4.43	8.52	7.47	0.03	3%	11.32	3.70
14/04/2016	370.80	137.18	1.23	5.10	1.24	5.91	8.70	8.46	0.03	4%	10.85	2.99
18/05/2016	345.80	129.21	1.21	5.67	1.74	7.38	8.88	9.45	0.04	4%	10.63	2.57
09/06/2016	392.84	124.98	1.17	5.41	1.62	7.93	8.99	12.03	0.04	3%	14.12	1.61

Tableau-A- 4 : : Résultats des analyses des concentrations en ions majeurs, silice et carbone organique dissous dans les eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 prélevées sur le site de la Grotte de Lascaux d'Octobre 2013 à Juin 2016.

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
05/11/2013	373.20	138.93	1.68	5.11	0.27	3.57	3.90	0.62	0.06	-7%	10.12	2.42
13/11/2013	407.50	150.29	1.39	4.00	0.34	4.22	6.03	0.92	0.04	-6%	10.06	3.17
22/11/2013	407.50	147.00	1.41	4.17	0.60	4.09	6.18	0.45	0.03	-5%	10.02	1.32
28/11/2013	408.70	148.61	1.42	4.21	0.41	3.62	6.78	0.29	0.04	-5%	10.03	4.41
04/12/2013	452.62	150.07	1.43	4.11	0.36	4.34	7.03	0.26	0.04	-1%	10.17	5.71
10/12/2013	455.06	152.11	1.42	4.44	0.61	5.06	8.14	3.13	0.03	-1%	10.19	2.19
17/12/2013	466.04	154.48	1.46	4.48	0.51	5.92	8.12	0.26	0.04	-1%	10.33	2.07
08/01/2014	458.10	154.97	1.48	4.64	0.60	5.34	7.09	0.28	0.04	-2%	9.40	2.15
16/01/2014	509.96	149.65	1.48	4.47	0.45	5.29	7.42	0.29	0.04	2%	9.21	2.05
27/01/2014	446.52	149.96	1.37	4.34	0.24	5.50	6.38	0.08	0.04	-1%	9.45	2.65
29/01/2014	513.62	151.55	1.43	4.41	0.27	5.54	6.00	0.17	0.04	5%	9.40	4.13
06/02/2014	489.22	149.30	1.44	5.44	1.97	5.64	6.51	0.15	0.05	3%	9.05	4.16
13/02/2014	477.02	149.14	1.55	4.62	0.51	5.73	6.00	0.38	0.04	2%	9.19	3.61
20/02/2014	453.84	151.58	1.60	4.76	0.44	5.93	6.47	0.20	0.04	-1%	9.15	2.98
26/02/2014	479.46	150.43	1.43	4.47	0.25	5.85	6.03	0.13	0.04	2%	9.22	2.85
06/03/2014	506.30	148.86	1.35	4.55	0.30	4.13	5.97	0.06	0.03	5%	9.24	4.88
20/03/2014	529.48	156.44	1.44	4.53	0.35	5.01	7.50	0.16	0.04	5%	9.86	3.85
27/03/2014	440.42	140.92	1.32	4.17	0.18	4.10	6.05	0.11	0.03	1%	9.64	4.31
04/04/2014	394.06	142.64	1.29	4.34	0.23	4.42	6.53	0.04	0.03	-5%	9.66	3.89
08/04/2014	408.70	143.10	1.39	4.43	0.35	4.52	6.85	0.03	0.03	-4%	9.77	3.39
17/04/2014	450.18	147.16	1.47	4.59	0.51	4.68	7.18	0.34	0.03	0%	10.24	3.00
30/04/2014	520.94	155.11	1.52	4.61	0.38	4.90	7.11	0.59	0.03	4%	10.50	2.91
14/05/2014	464.82	156.06	1.47	4.38	0.21	5.03	7.07	0.10	0.03	-1%	10.75	2.98
30/12/2014	378.20	91.64	0.99	4.09	0.41	6.18	8.59	0.79	0.05	15%	6.58	3.76
06/01/2015	378.70	89.80	0.97	4.55	0.35	6.51	8.77	0.69	0.04	16%	7.10	3.13
23/01/2015	379.00	83.83	0.95	4.80	0.32	6.45	8.77	0.79	0.13	19%	7.61	2.49

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
30/01/2015	368.44	85.04	0.91	3.88	0.25	6.27	7.79	0.91	0.05	17%	7.57	3.18
03/02/2015	401.55	134.10	1.31	4.12	0.30	4.80	7.47	1.22	0.05	0%	8.46	3.05
19/02/2015	402.25	144.10	1.38	4.39	0.56	5.10	8.08	0.73	0.06	-4%	9.33	3.98
24/02/2015	407.60	145.47	1.40	4.27	0.24	4.85	7.55	0.12	0.02	4%	10.27	3.16
04/03/2015	410.50	146.55	1.39	4.30	0.40	4.72	6.54	0.37	0.04	-4%	9.79	4.69
10/03/2015	411.20	147.20	1.47	4.37	0.30	5.01	6.49	1.79	0.04	-5%	9.97	3.94
17/03/2015	412.50	147.07	1.45	4.41	0.46	5.01	6.82	0.59	0.04	-4%	9.84	3.78
24/03/2015	423.20	148.55	1.46	4.40	0.42	5.24	7.17	0.39	0.03	-4%	9.95	2.52
02/04/2015	435.54	153.11	1.47	4.42	0.32	5.67	6.96	0.15	0.05	-4%	10.41	0.84
16/04/2015	426.80	151.36	1.39	4.43	0.27	5.45	7.08	0.20	0.04	-4%	9.14	0.89
22/04/2015	439.20	151.63	1.41	4.43	0.32	5.46	7.15	1.20	0.04	-3%	10.97	3.21
30/04/2015	450.18	152.74	1.42	4.47	0.34	5.59	7.54	1.15	0.05	-2%	10.86	3.03
04/05/2015	425.11	153.91	1.44	4.77	0.77	5.27	6.65	1.92	0.04	-5%	10.27	2.83
05/05/2015	423.55	151.84	1.40	4.37	0.25	5.09	6.16	0.54	0.04	-5%	5.74	2.47
07/05/2015	426.50	151.49	1.41	4.47	0.37	5.12	6.18	0.12	0.04	-4%	8.73	4.62
12/05/2015	428.95	151.15	1.41	4.57	0.49	5.40	7.52	0.29	0.04	-4%	10.26	2.82
28/05/2015	430.66	150.80	1.42	4.67	0.61	5.67	8.87	0.46	0.03	-3%	10.57	2.66
05/06/2015	437.33	153.24	1.41	4.18	0.29	5.44	6.89	0.18	0.04	-3%	10.98	2.24
10/06/2015	453.84	152.87	1.40	4.19	0.24	5.35	6.89	0.98	0.04	-1%	10.88	1.15
06/01/2016	337.94	98.00	1.52	6.01	0.56	3.48	5.38	0.15.	0.05	2%	8.12	8.19
07/01/2016	372.10	114.96	1.50	5.09	0.23	2.91	14.16	0.51	0.03	3%	7.92	9.53
07/01/2016	370.88	148.37	1.43	4.24	7.71	2.99	5.10	0.60	0.05	-13%	11.94	8.66
08/01/2016	367.22	139.88	1.33	3.67	7.14	2.25	13.16	0.69	0.03	-8%	10.59	6.05
11/01/2016	363.56	141.85	1.35	3.81	0.25	2.54	7.88	0.59	0.06	-9%	10.19	6.86
12/01/2016	408.70	140.66	1.39	4.08	0.42	2.54	8.04	0.44	0.04	-3%	10.02	6.64
15/01/2016	422.12	141.52	1.38	4.04	0.29	2.61	8.05	0.42	0.04	-2%	9.84	6.36
20/01/2016	443.23	143.63	1.40	4.19	0.25	2.95	7.90	0.53	0.04	0%	10.39	4.58
25/01/2016	441.64	142.00	1.38	4.43	0.18	2.78	7.73	0.34	0.07	0%	10.05	5.25

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
26/01/2016	423.34	142.08	1.39	4.44	0.19	2.83	7.83	0.36	0.07	-2%	9.99	4.57
27/01/2016	448.11	143.27	1.39	4.28	0.34	2.90	7.80	0.37	0.04	1%	10.41	4.34
03/02/2016	411.14	143.59	1.32	5.12	0.17	3.02	8.04	0.34	0.06	-4%	10.45	5.50
05/02/2016	395.28	143.38	1.35	4.46	0.35	3.10	8.69	0.41	0.12	-5%	10.24	3.94
08/02/2016	411.14	143.03	1.35	4.28	0.20	2.94	8.52	0.43	0.13	-3%	10.24	4.41
09/02/2016	413.43	144.09	1.35	4.37	0.27	2.85	8.03	0.54	0.05	-4%	9.84	4.40
10/02/2016	401.38	146.93	1.39	4.49	0.27	2.80	9.28	0.30	0.13	-6%	8.38	5.32
12/02/2016	395.28	144.33	1.36	4.37	0.28	2.83	8.47	0.33	0.13	-6%	10.45	5.01
15/02/2016	383.08	145.79	1.38	4.65	0.21	2.80	9.31	0.39	0.05	-8%	10.57	4.72
17/02/2016	374.54	145.43	1.35	5.14	0.18	2.76	8.35	0.88	0.07	-9%	10.21	7.94
19/02/2016	398.94	146.10	1.35	4.49	0.32	2.86	8.63	0.37	0.09	-6%	10.21	3.66
22/02/2016	409.92	147.20	1.37	4.43	0.25	2.84	8.86	0.27	0.13	-5%	10.47	3.76
23/02/2016	414.80	146.95	1.42	4.43	0.24	2.96	8.35	0.44	0.04	-4%	10.61	3.45
29/02/2016	412.34	135.29	1.30	4.61	0.27	3.03	8.25	0.22	0.07	-1%	10.45	3.39
02/03/2016	425.76	135.64	1.31	4.64	0.23	3.05	8.26	0.31	0.06	1%	13.47	3.33
04/03/2016	405.02	137.58	1.33	4.94	0.81	3.05	8.41	0.29	0.07	-3%	10.57	3.22
07/03/2016	405.02	163.90	1.36	4.38	0.32	2.92	9.01	0.44	0.14	-10%	9.79	3.52
08/03/2016	426.98	193.49	1.55	4.51	0.30	2.90	8.24	0.37	0.08	-16%	7.50	3.64
09/03/2016	425.76	153.84	1.38	4.14	0.29	2.87	8.86	0.32	0.13	-5%	8.91	3.52
14/03/2016	451.38	205.46	0.94	4.98	0.26	2.89	8.33	0.29	0.07	-16%	8.67	3.32
16/03/2016	434.30	171.27	1.49	4.99	0.30	2.96	8.32	0.16	0.07	-10%	8.79	3.16
22/03/2016	435.52	177.50	1.47	5.11	0.44	3.11	8.56	0.21	0.07	-11%	9.62	2.98
25/03/2016	445.30	192.61	1.56	4.23	0.35	3.23	8.68	0.41	0.04	-14%	9.50	2.66
29/03/2016	383.08	191.41	1.54	4.78	0.64	3.17	8.48	0.20	0.05	-21%	9.12	2.62
31/03/2016	359.90	156.41	1.46	4.50	0.43	3.26	8.51	0.38	0.05	-14%	9.46	2.55
05/04/2016	346.48	138.07	1.34	4.56	0.71	2.76	7.54	0.47	0.06	-10%	8.55	3.30
07/04/2016	411.14	134.22	1.28	4.03	0.32	2.87	7.95	0.61	0.07	0%	8.31	3.70
11/04/2016	412.36	153.01	1.36	4.37	0.35	3.10	8.48	0.49	0.05	-6%	8.33	3.46

Date	HCO_3^- ($mg.L^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.L^{-1}$)	Na^+ ($mg.L^{-1}$)	K^+ ($mg.L^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.L^{-1}$)	Cl^- ($mg.L^{-1}$)	NO_3^- ($mg.L^{-1}$)	F^- ($mg.L^{-1}$)	Balance ionique	SiO_2 ($mg.L^{-1}$)	COD ($mg.L^{-1}$)
14/04/2016	425.93	167.34	1.36	4.17	0.33	2.91	8.19	0.43	0.04	-9%	8.33	3.97
19/04/2016	395.28					2.81	7.81	0.30	0.05		8.37	3.95
22/04/2016	422.12					2.95	8.67	0.37	0.08		7.88	3.29
25/04/2016	412.36					3.21	8.63	0.33	0.05		8.77	3.40
28/04/2016	447.74					3.32	8.28	0.29	0.06		8.77	3.26
04/05/2016	403.82					3.25	8.51	0.24	0.05		9.42	3.15
10/05/2016	405.60					3.10	8.53	0.27	0.05		8.49	3.45
14/05/2016	414.60					3.59	8.83	0.28	0.06		9.36	3.18
18/05/2016	428.22					3.52	8.91	0.29	0.05		8.73	3.25
24/05/2016	488.00					3.58	8.82	2.67	0.05		10.28	2.77
26/05/2016	463.60					3.71	8.91	0.63	0.12		11.84	2.60
02/06/2016	434.32					3.72	8.65	0.49	0.05		13.39	2.85
03/06/2016	383.08					3.43	8.03	0.41	0.04		10.20	3.95
06/06/2016	387.96					3.26	7.52	0.48	0.04		12.99	
09/06/2016	445.30					3.34	8.07	0.43	0.04		12.92	
13/06/2016	434.32					4.22	7.47	0.08	0.05		13.16	
16/06/2016	450.10					4.60	7.49	0.18	0.04		13.26	
17/06/2016	386.74					3.93	6.46	0.33	0.06		12.77	
21/06/2016	385.60					3.90	6.58	0.05	0.06		12.61	
24/06/2016	405.50										12.99	
28/06/2016	379.42										13.01	
04/07/2016	437.98											
05/07/2016	438.20											
08/07/2016	441.50											
11/07/2016	451.60											

Annexe 10 : Récapitulatif des données isotopiques pour les prélèvements des eaux de pluie, de la Haute Fageotte et de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Tableau-A- 5 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H	δ13C-TDIC (‰)
23/10/2013	-7.38	-42.19	16.84	
30/10/2013	-6.81	-42.92	11.57	
13/11/2013	-6.76	-44.75	9.31	
28/11/2013	-6.02	-39.06	9.09	
05/12/2013	-6.58	-39.60	13.00	
17/12/2013	-6.95	-42.99	12.59	
08/01/2014	-6.49	-44.35	7.58	
16/01/2014	-6.87	-44.61	10.34	
27/01/2014	-6.66	-43.23	10.02	
29/01/2014	-6.88	-42.68	12.36	
06/02/2014	-7.60	-44.70	16.06	
13/02/2014	-7.52	-44.67	15.45	
20/02/2014	-6.83	-43.34	11.31	
26/02/2014	-7.08	-43.23	13.42	
06/03/2014	-6.85	-41.54	13.29	
20/03/2014	-7.43	-44.38	15.09	
27/03/2014	-6.43	-38.83	12.61	
04/04/2014	-6.69	-39.79	13.73	-14.05
08/04/2014	-6.80	-39.92	14.50	-13.59
17/04/2014	-6.73	-39.75	14.11	-13.83
30/04/2014	-6.70	-40.13	13.47	-14.05
05/06/2014	-6.71	-38.90	14.79	-13.94
26/06/2014	-6.49	-38.34	13.57	-13.45
22/07/2014	-6.45	-38.49	13.11	-13.59
18/09/2014	-6.59	-38.88	13.85	-13.55
01/10/2014	-6.58	-39.40	13.23	-13.42
06/11/2014	-6.35	-38.54	12.29	-13.41
21/11/2014	-6.37	-38.45	12.50	-13.17
15/12/2014	-6.20	-37.50	12.06	-13.33
06/01/2015	-6.29	-39.83	10.52	-12.86
13/01/2015	-6.26	-40.08	9.98	-12.87
23/01/2015	-6.31	-39.55	10.91	-12.66
30/01/2015	-6.29	-38.42	11.93	-12.94
03/02/2015	-6.31	-39.55	10.96	-12.96
19/02/2015	-6.25	-40.45	9.55	-12.97
24/02/2015	-6.20	-38.93	10.66	-12.89
10/03/2015	-6.19	-39.45	10.07	-13.03
17/03/2015	-6.23	-39.05	10.81	-13.12
02/04/2015	-6.22	-37.90	11.88	-12.85
15/04/2015	-7.57	-39.57	20.99	-13.30
22/04/2015	-7.32	-40.20	18.36	-13.11
30/04/2015	-7.32	-38.40	20.15	-13.05
04/05/2015	-7.56	-43.21	17.29	-13.00

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H	δ13C-TDIC (‰)
12/05/2015	-7.66	-41.56	19.69	-12.94
28/05/2015	-7.73	-40.48	21.38	-13.08
05/06/2015	-8.07	-42.56	22.04	-13.16
17/06/2015	-7.93	-41.24	22.22	-13.52
07/07/2015	-5.28	-36.61	5.66	-12.98
01/09/2015	-6.22	-38.49	11.23	-10.46
10/09/2015	-6.53	-41.36	10.86	-11.44
16/09/2015	-6.73	-39.44	14.41	-12.87
15/10/2015	-6.94	-42.23	13.30	-13.03
21/10/2015	-6.20	-44.02	5.56	-13.25
17/11/2015	-6.57	-42.29	10.28	-12.31
14/12/2015	-6.45	-43.46	8.15	-12.64
22/12/2015	-6.33	-44.62	6.02	-12.97
01/12/2016	-6.62	-43.03	9.93	-13.16
20/01/2016	-6.52	-35.84	16.32	-13.07
27/01/2016	-6.54	-41.51	10.81	-13.11
09/02/2016	-6.37	-39.18	11.78	-13.31
23/02/2016	-6.63	-38.81	14.26	
25/03/2016	-6.90	-38.43	16.73	
14/04/2016	-6.98	-41.81	14.01	
18/05/2016	-7.46	-41.53	18.12	
09/06/2016	-7.93	-41.24	22.22	

Tableau-A- 6 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H	δ13C-TDIC (‰)
05/11/2013	-6.60	-42.37	10.42	
13/11/2013	-6.60	-42.38	10.40	
22/11/2013	-7.20	-45.97	11.66	
28/11/2013	-6.29	-41.42	8.86	
04/12/2013	-7.09	-40.66	16.03	
10/12/2013	-7.22	-40.82	16.97	
17/12/2013	-6.73	-40.66	13.16	
08/01/2014	-6.98	-42.35	13.47	
16/01/2014	-5.73	-42.92	2.90	
27/01/2014	-6.13	-37.54	11.52	
29/01/2014	-7.13	-41.50	15.50	
06/02/2014	-6.52	-39.03	13.14	
13/02/2014	-7.47	-43.77	16.02	
20/02/2014	-6.80	-39.49	14.94	
26/02/2014	-7.19	-41.57	15.94	
06/03/2014	-6.57	-40.88	11.67	
20/03/2014	-6.57	-45.52	7.01	
27/03/2014	-6.74	-42.41	11.53	-13.54
04/04/2014	-6.50	-39.52	12.47	-13.55
08/04/2014	-6.21	-37.22	12.50	-13.60

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H	δ13C-TDIC (‰)
17/04/2014	-5.95	-41.51	6.11	-14.00
30/04/2014	-6.08	-40.37	8.23	-13.71
14/05/2014	-6.46	-41.80	9.86	-13.75
23/01/2015				-11.94
30/01/2015	-6.83	-38.73	15.88	-12.57
03/02/2015	-7.12	-40.03	16.91	-13.25
19/02/2015	-6.77	-40.19	13.99	-12.83
24/02/2015	-6.71	-38.56	15.12	-14.12
04/03/2015	-6.83	-39.68	14.99	-13.89
10/03/2015	-6.54	-41.19	11.11	-14.10
17/03/2015	-6.84	-40.06	14.64	-14.11
24/03/2015	-6.70	-41.09	12.54	-13.98
02/04/2015	-6.75	-40.56	13.47	-14.06
16/04/2015	-6.80	-39.69	14.73	-14.13
22/04/2015	-6.81	-42.44	12.07	-14.48
30/04/2015	-7.05	-40.93	15.43	-14.42
04/05/2015	-7.69	-41.88	19.66	-14.50
05/05/2015	-7.82	-43.53	19.01	-14.57
07/05/2015	-7.98	-38.56	25.30	-14.01
12/05/2015	-6.87	-40.67	14.26	-12.13
28/05/2015	-7.28	-39.69	18.56	-12.43
05/06/2015	-8.29	-39.88	26.41	-14.22
10/06/2015	-7.45	-41.86	17.76	-14.09
06/01/2016	-7.36	-38.71	20.18	-14.42
07/01/2016	-5.48	-36.99	7.48	-13.20
08/01/2016	-5.37	-42.17	4.53	-13.19
11/01/2016	-5.84	-40.51	2.47	-13.91
12/01/2016	-6.51	-41.26	10.78	-13.55
15/01/2016	-5.13	-41.83	13.37	-13.49
20/01/2016	-6.90	-42.92	14.19	-13.40
25/01/2016	-7.14	-44.33	8.11	-13.68
26/01/2016	-6.56	-42.94	11.52	-13.96
27/01/2016	-6.81	-43.69	14.04	-13.36
03/02/2016	-7.22	-40.95	13.88	-12.94
05/02/2016	-6.85	-44.65	12.97	-13.85
08/02/2016	-7.20	-42.68	8.54	-13.91
09/02/2016	-6.40	-43.07	11.71	-12.70
10/02/2016	-6.85	-42.09	7.71	-14.00
12/02/2016	-6.22	-40.69	4.06	-13.99
15/02/2016	-5.59	-42.45	11.84	-14.26
17/02/2016	-6.79	-41.62	14.49	-13.73
19/02/2016	-7.01	-42.22	13.03	-14.06
22/02/2016	-6.91	-41.19	14.09	-13.67
23/02/2016	-5.21	-31.72	11.62	-13.69
29/02/2016	-5.42	-41.90	4.64	-13.78
02/03/2016	-5.82	-39.21	6.69	-13.70
04/03/2016	-6.53	-44.59	7.63	

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H	δ13C-TDIC (‰)
07/03/2016	-6.61	-47.95	4.94	
08/03/2016	-6.52	-47.70	4.44	
09/03/2016	-6.82	-44.82	9.76	
14/03/2016	-7.11	-47.49	9.38	
16/03/2016	-6.38	-44.55	6.47	
22/03/2016	-7.27	-44.62	13.51	
25/03/2016	-6.39	-43.04	8.05	
29/03/2016	-6.51	-50.31	1.73	
31/03/2016	-6.40	-49.33	1.90	
05/04/2016	-7.04	-50.43	5.90	
07/04/2016	-7.05	-53.89	2.53	
11/04/2016	-6.83	-46.51	8.16	
14/04/2016	-6.86	-45.93	8.91	
19/04/2016	-6.91	-43.64	11.62	
22/04/2016	-7.11	-46.03	10.87	
25/04/2016	-6.95	-38.22	17.40	
28/04/2016	-6.67	-45.27	8.09	
04/05/2016	-6.47	-45.91	5.83	
10/05/2016	-7.20	-41.15	16.49	
14/05/2016	-6.09	-45.97	2.76	
18/05/2016	-7.07	-45.33	11.23	
24/05/2016	-6.43	-41.08	10.38	
26/05/2016	-6.90	-47.72	7.51	
02/06/2016	-6.37	-43.19	7.74	
03/06/2016	-6.58	-40.89	11.78	
06/06/2016	-6.99	-50.24	5.66	
09/06/2016	-6.50	-44.99	6.99	
13/06/2016	-7.22	-41.19	16.59	
16/06/2016	-6.63	-42.69	10.35	

Tableau-A- 7 : Données isotopiques pour les prélèvements des eaux de pluie effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

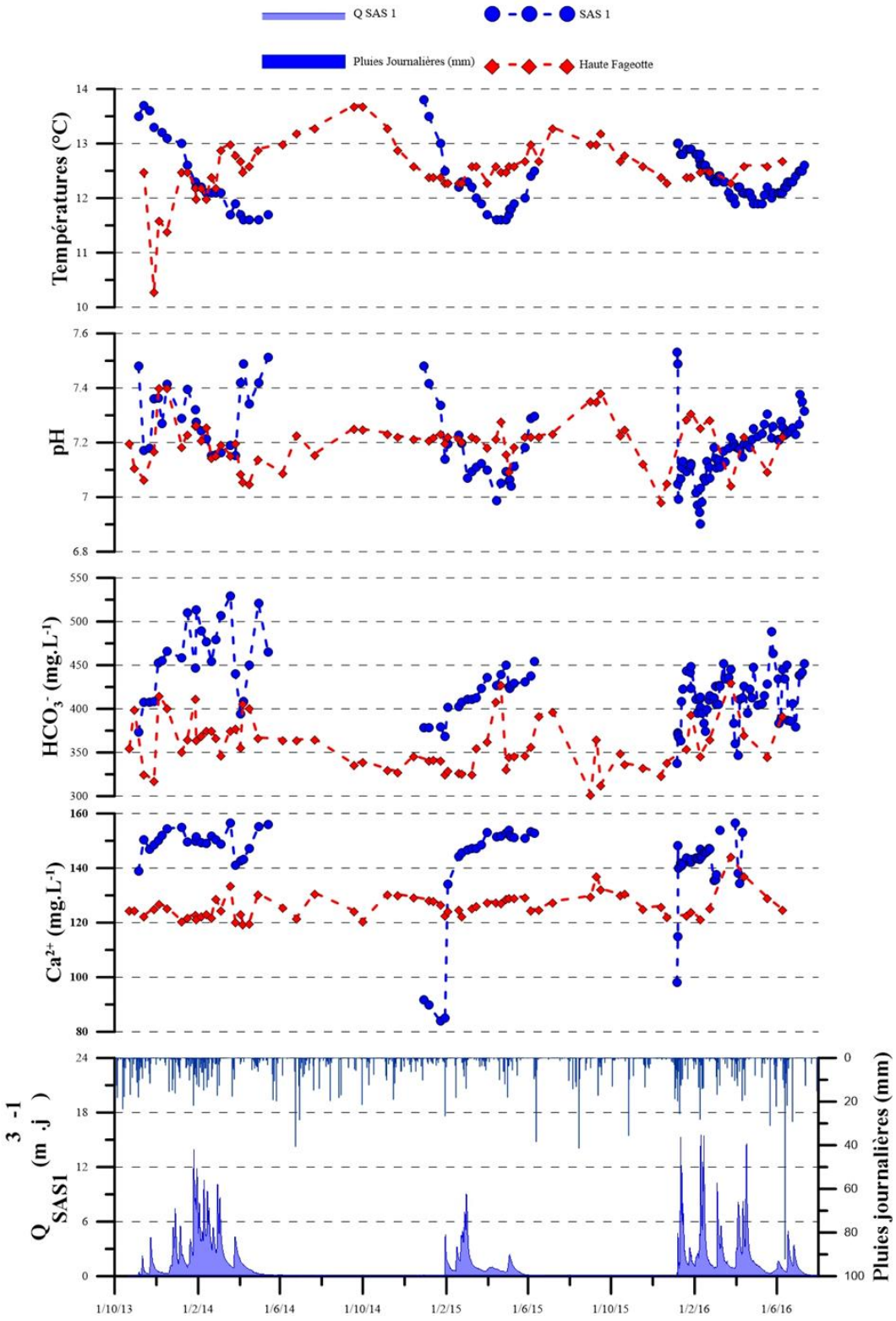
Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H
07/10/2013	-6.93	-39.18	16.26
21/10/2013	-8.01	-41.19	22.89
28/10/2013	-5.66	-33.07	12.23
04/11/2013	-9.26	-54.03	20.03
13/11/2013	-6.31	-29.00	21.46
18/11/2013	-6.38	-26.58	24.46
25/11/2013	-10.56	-62.07	22.38
02/12/2013	-6.10	-24.83	23.96
16/12/2013	-6.96	-34.06	21.66
24/12/2013	-8.06	-40.36	24.14
30/12/2013	-9.53	-60.50	15.72
06/01/2014	-12.07	-81.41	15.12
13/01/2014	-9.42	-59.13	16.21
20/01/2014	-11.91	-79.85	15.44

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H
27/01/2014	-7.77	-49.32	12.88
03/02/2014	-11.55	-69.91	22.48
10/02/2014	-8.51	-45.98	22.14
17/02/2014	-8.27	-46.91	19.25
24/02/2014	-6.43	-25.24	26.17
03/03/2014	-8.87	-46.88	24.06
10/03/2014	-9.04	-48.71	23.64
24/03/2014	-7.45	-38.90	20.67
31/03/2014	-4.67	-26.91	10.44
08/04/2014	-3.37	-20.66	6.29
22/04/2014	-1.80	-8.57	5.81
28/04/2014	-3.30	-15.92	10.51
05/05/2014	-6.60	-39.12	13.65
20/05/2014	-6.62	-39.53	13.43
26/05/2014	-6.64	-39.89	13.21
02/06/2014	-9.51	-62.31	13.77
11/06/2014	-10.35	-68.32	14.51
24/06/2014	-5.59	-24.38	20.35
30/06/2014	-4.56	-15.37	21.14
07/07/2014	-3.08	-9.01	15.62
15/07/2014	-5.36	-22.15	20.75
21/07/2014	-8.41	-52.51	14.73
28/07/2014	-2.31	-12.76	5.74
04/08/2014	-10.06	-70.07	10.40
11/08/2014	-3.40	-12.74	14.49
18/08/2014	-7.43	-32.84	26.63
01/09/2014	-4.22	-22.31	11.44
08/09/2014	-1.78	-4.32	9.91
16/09/2014	-6.10	-31.77	17.04
24/09/2014	-6.35	-37.71	13.09
29/09/2014	-5.70	-31.16	14.41
06/10/2014	-4.99	-25.04	14.91
20/10/2014	-7.31	-38.67	19.84
27/10/2014	-4.75	-14.97	23.04
03/11/2014	-5.22	-18.78	23.01
12/11/2014	-12.84	-89.68	13.07
17/11/2014	-10.09	-62.59	18.12
24/11/2014	-8.29	-38.69	27.62
01/12/2014	-8.24	-53.89	12.03
08/12/2014	-7.76	-34.18	27.89
15/12/2014	-5.47	-18.38	25.34
08/01/2015	-5.22	-28.60	13.20
12/01/2015	-4.98	-28.83	11.00
19/01/2015	-7.49	-40.00	19.88
27/01/2015	-8.07	-51.00	13.55
03/02/2015	-7.45	-42.00	17.60

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H
16/02/2015	-7.56	-45.00	15.46
23/02/2015	-10.30	-69.00	13.37
02/03/2015	-6.06	-36.00	12.48
09/03/2015	-6.89	-44.13	11.00
16/03/2015	-4.84	-25.00	13.73
24/03/2015	-2.94	-12.53	11.00
30/03/2015	-8.20	-54.59	11.00
07/04/2015	-9.29	-61.00	13.29
21/04/2015	-6.55	-41.39	11.00
28/04/2015	-3.08	-13.66	11.00
04/05/2015	-1.70	-2.61	11.00
11/05/2015	-6.85	-39.00	15.81
19/05/2015	-6.81	-40.00	14.50
01/06/2015	-6.15	-34.79	14.40
15/06/2015	-5.49	-29.57	14.31
03/08/2015	-4.82	-24.36	14.21
11/08/2015	-4.46	-21.92	13.74
17/08/2015	-4.77	-25.80	12.36
25/08/2015	-3.83	-23.46	7.21
01/09/2015	-5.00	-34.60	5.39
14/09/2015	-4.72	-26.27	11.53
22/09/2015	-3.37	-16.99	9.99
28/09/2015	-2.40	-7.33	11.83
06/10/2015	-6.66	-37.76	15.50
13/10/2015	-3.73	-19.27	10.59
26/10/2015	-6.20	-40.53	9.04
02/11/2015	-8.66	-61.78	7.48
09/11/2015	-6.09	-40.72	7.97
16/11/2015	-5.88	-33.62	13.39
23/11/2015	-4.70	-29.38	8.19
30/11/2015	-5.95	-38.94	8.66
22/12/2015	-4.51	-25.46	10.62
06/01/2016	-9.19	-65.26	8.25
12/01/2016	-9.01	-64.94	7.13
20/01/2016	-7.50	-51.91	8.06
26/01/2016	-7.33	-47.97	10.70
02/02/2016	-2.90	-12.17	11.00
10/02/2016	-7.54	-45.37	14.91
16/02/2016	-7.77	-46.51	15.67
22/02/2016	-10.93	-72.29	15.15
25/02/2016	-7.72	-48.03	13.76
29/02/2016	-4.52	-23.77	12.37
07/03/2016	-6.60	-40.46	12.37
15/03/2016	-10.96	-69.83	17.88
22/03/2016	-10.71	-75.35	10.36
29/03/2016	-5.33	-34.14	8.50

Date	δ18O (‰)	δ2H (‰)	Excès 2H
04/04/2016	-6.54	-47.71	4.64
12/04/2016	-5.72	-42.03	3.71
22/04/2016	-7.39	-43.46	15.67
28/04/2016	-4.63	-26.10	10.98
02/05/2016	-7.14	-45.13	12.02
17/05/2016	-5.63	-44.00	1.04
23/05/2016	-7.09	-42.89	13.81
31/05/2016	-4.89	-30.43	8.67
07/06/2016	-5.72	-40.76	4.97

Annexe 11 : Evolution des paramètres d'entrée des calculs d'équilibres calco-carboniques (températures, pH, HCO3- et Ca2+) à l'émergence épikarstique du SAS et à la source de la Haute Fageotte d'Octobre 2013 à Juillet 2016.



Annexe 12 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 et de la source de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Tableau-A- 8 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence épikarstique du SAS 1 effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Cycle	Date	PCO_2eq	PCO_2sat	ISc
2013-2014	*05/11/2013*	1.0%	3.5%	0.54
	13/11/2013	2.2%	4.4%	0.30
	22/11/2013	2.2%	4.3%	0.30
	28/11/2013	1.4%	4.3%	0.48
	04/12/2013	1.6%	5.6%	0.54
	10/12/2013	2.0%	5.4%	0.44
	17/12/2013	1.5%	5.6%	0.59
	08/01/2014	1.9%	5.5%	0.46
	16/01/2014	1.6%	6.4%	0.59
	27/01/2014	1.7%	4.9%	0.46
	29/01/2014	2.1%	6.4%	0.48
	06/02/2014	2.2%	5.8%	0.41
	13/02/2014	2.3%	5.5%	0.37
	20/02/2014	2.6%	5.1%	0.30
	26/02/2014	2.7%	5.6%	0.32
	06/03/2014	2.8%	6.2%	0.34
	20/03/2014	2.7%	6.8%	0.40
	27/03/2014	2.5%	4.5%	0.26
	04/04/2014	1.2%	3.6%	0.48
	08/04/2014	1.0%	3.9%	0.57
	17/04/2014	1.6%	4.8%	0.46
	30/04/2014	1.6%	6.5%	0.62
	14/05/2014	1.1%	5.3%	0.67
2014-2015	*30/01/2015*	2.2%	2.2%	-0.01
	03/02/2015	2.1%	3.6%	0.24
	19/02/2015	1.9%	3.9%	0.31
	24/02/2015	2.1%	4.1%	0.29
	04/03/2015	2.8%	4.1%	0.17
	10/03/2015	2.7%	4.1%	0.19
	17/03/2015	2.6%	4.1%	0.21
	24/03/2015	2.6%	4.3%	0.23
	02/04/2015	2.7%	4.7%	0.23
	16/04/2015	3.5%	4.4%	0.11
	22/04/2015	3.1%	4.7%	0.18
	30/04/2015	2.9%	4.9%	0.23
	04/05/2015	2.9%	4.5%	0.18
	05/05/2015	2.9%	4.4%	0.18
	07/05/2015	3.1%	4.5%	0.16
	12/05/2015	2.7%	4.5%	0.23

	28/05/2015	2.3%	4.6%	0.30
	05/06/2015	1.8%	4.8%	0.43
	10/06/2015	1.8%	5.2%	0.46
2015-2016	*06/01/2016*	0.8%	2.3%	0.43
	07/01/2016	1.0%	2.9%	0.47
	07/01/2016	2.7%	2.9%	0.03
	08/01/2016	3.1%	3.0%	-0.02
	11/01/2016	2.5%	2.9%	0.05
	12/01/2016	2.6%	4.1%	0.20
	15/01/2016	2.5%	4.3%	0.24
	20/01/2016	2.9%	4.8%	0.22
	25/01/2016	2.8%	4.8%	0.24
	26/01/2016	2.6%	4.4%	0.23
	27/01/2016	2.7%	4.9%	0.25
	03/02/2016	3.2%	4.2%	0.12
	05/02/2016	3.4%	3.9%	0.06
	08/02/2016	3.7%	4.2%	0.05
	09/02/2016	4.2%	4.3%	0.01
	10/02/2016	3.0%	3.7%	0.09
	12/02/2016	3.4%	3.6%	0.03
	15/02/2016	2.6%	3.3%	0.09
	17/02/2016	2.7%	3.1%	0.06
	19/02/2016	2.4%	3.6%	0.18
	22/02/2016	2.6%	4.2%	0.21
	23/02/2016	2.8%	4.3%	0.18
	29/02/2016	2.2%	3.9%	0.25
	02/03/2016	2.5%	4.2%	0.23
	04/03/2016	2.5%	3.8%	0.18
	07/03/2016	2.4%	3.8%	0.19
	08/03/2016	2.5%	4.3%	0.24
	09/03/2016	2.7%	4.3%	0.21
	14/03/2016	2.4%	5.0%	0.31
	16/03/2016	2.6%	4.5%	0.24
	22/03/2016	2.3%	4.5%	0.29
	25/03/2016	2.1%	4.7%	0.35
	29/03/2016	1.9%	3.1%	0.21
	31/03/2016	1.9%	2.7%	0.14
	05/04/2016	1.9%	2.4%	0.11
	07/04/2016	2.2%	3.9%	0.25
	11/04/2016	2.3%	3.9%	0.22
	14/04/2016	2.2%	4.2%	0.29
	19/04/2016	2.1%	3.6%	0.25
	22/04/2016	2.2%	4.3%	0.29
	25/04/2016	2.0%	4.0%	0.30
	28/04/2016	2.0%	5.0%	0.40

	04/05/2016	1.9%	3.8%	0.29
	10/05/2016	1.9%	3.8%	0.30
	14/05/2016	1.8%	4.1%	0.36
	18/05/2016	1.7%	4.5%	0.42
	24/05/2016	2.3%	6.3%	0.43
	26/05/2016	2.0%	5.5%	0.44
	02/06/2016	2.1%	4.6%	0.34
	03/06/2016	1.9%	3.3%	0.24
	06/06/2016	1.6%	3.4%	0.32
	09/06/2016	2.0%	4.9%	0.40
	13/06/2016	2.0%	4.6%	0.36
	16/06/2016	2.1%	5.1%	0.39
	17/06/2016	1.8%	3.4%	0.28
	21/06/2016	1.8%	3.4%	0.28
	24/06/2016	1.8%	3.8%	0.31
	28/06/2016	1.8%	3.2%	0.24
	04/07/2016	1.9%	4.7%	0.39
	05/07/2016	1.5%	4.7%	0.50
	08/07/2016	1.6%	4.8%	0.48
	11/07/2016	1.7%	5.1%	0.47

Tableau-A- 9 : Récapitulatif des données de PCO2éq, ISc et PCO2sat calculées pour les prélèvements des eaux de l'émergence de la Haute Fageotte effectués d'Octobre 2013 à Juillet 2016.

Cycle	Date	PCO_2eq	PCO_2sat	ISc
2013-2014	23/10/2013	1.8%	2.8%	0.19
	30/10/2013	2.5%	3.5%	0.14
	13/11/2013	2.3%	2.3%	0.01
	28/11/2013	1.7%	2.0%	0.08
	05/12/2013	1.3%	3.6%	0.44
	17/12/2013	1.3%	3.3%	0.42
	08/01/2014	1.8%	2.6%	0.16
	16/01/2014	1.7%	2.9%	0.22
	27/01/2014	1.8%	3.6%	0.29
	29/01/2014	1.6%	2.8%	0.25
	06/02/2014	1.8%	2.9%	0.20
	13/02/2014	1.7%	3.0%	0.25
	20/02/2014	2.2%	3.0%	0.15
	26/02/2014	2.1%	3.0%	0.16
	06/03/2014	1.8%	2.7%	0.17
	20/03/2014	2.1%	3.3%	0.20
	27/03/2014	1.9%	3.1%	0.20
	04/04/2014	2.4%	2.8%	0.07
	08/04/2014	2.9%	3.5%	0.08
	17/04/2014	2.9%	3.4%	0.07
	30/04/2014	2.2%	3.1%	0.16
	05/06/2014	2.4%	3.0%	0.10

	26/06/2014	1.8%	3.0%	0.23
	22/07/2014	2.1%	3.2%	0.19
	18/09/2014	1.6%	2.6%	0.23
2014-2015	01/10/2014	1.6%	2.6%	0.22
	06/11/2014	1.6%	2.6%	0.22
	21/11/2014	1.6%	2.5%	0.20
	15/12/2014	1.7%	2.7%	0.21
	06/01/2015	1.7%	2.6%	0.19
	13/01/2015	1.7%	2.6%	0.20
	23/01/2015	1.6%	2.6%	0.21
	30/01/2015	1.7%	2.3%	0.14
	03/02/2015	1.6%	2.4%	0.18
	19/02/2015	1.6%	2.4%	0.17
	24/02/2015	1.6%	2.3%	0.15
	10/03/2015	1.6%	2.4%	0.18
	17/03/2015	1.7%	2.8%	0.21
	02/04/2015	1.9%	2.9%	0.18
	15/04/2015	2.0%	3.7%	0.27
	22/04/2015	1.8%	4.0%	0.34
	30/04/2015	1.9%	2.5%	0.13
	04/05/2015	2.2%	2.7%	0.09
	12/05/2015	1.8%	2.7%	0.18
	28/05/2015	1.7%	2.8%	0.21
	05/06/2015	1.8%	2.9%	0.21
	17/06/2015	1.9%	3.4%	0.26
	07/07/2015	1.9%	3.6%	0.29
	01/09/2015	1.1%	2.1%	0.30
	10/09/2015	1.3%	3.2%	0.39
	16/09/2015	1.0%	2.3%	0.35
2015-2016	15/10/2015	1.7%	2.8%	0.23
	21/10/2015	1.5%	2.6%	0.24
	17/11/2015	2.0%	2.5%	0.10
	14/12/2015	2.8%	2.4%	-0.06
	22/12/2015	2.5%	2.3%	-0.03
	01/12/2016	2.0%	2.3%	0.06
	20/01/2016	1.5%	2.7%	0.27
	27/01/2016	1.6%	3.4%	0.34
	09/02/2016	1.6%	2.5%	0.21
	23/02/2016	1.5%	2.9%	0.27
	25/03/2016	3.1%	4.5%	0.15
	14/04/2016	2.6%	3.6%	0.13
	18/05/2016	2.2%	2.7%	0.09
	09/06/2016	1.9%	3.4%	0.26

Résumé :

Depuis son invention en 1940 mais surtout consécutivement à sa fermeture au public en 1963, la conservation de la Grotte de Lascaux se base entre autres sur la compréhension de ses interactions avec le massif karstique environnant et notamment les processus siégeant dans l'épikarst et la zone de transmission superficielle. C'est pourquoi ces travaux de thèse se sont attachés à comprendre la dynamique du CO_2 dans le continuum sol-épikarst-cavité afin d'en évaluer les potentiels impacts sur la conservation des parois. Nous bénéficions à Lascaux d'une fenêtre d'observation sur les écoulements provenant de l'épikarst sus-jacent dans le SAS 1 de la cavité, mais aussi d'une instrumentation conséquente. Elle permet l'acquisition de nombreuses séries de données temporelles des paramètres microclimatiques ainsi que des teneurs en CO_2 de l'air en différents points de la cavité ou encore du débit de l'émergence épikarstique depuis le début des années 2000.

Une première partie de l'étude est consacrée à la caractérisation de la dynamique du CO_2 dans le contexte d'un épikarst sous couverture pédologique. A cette fin, une parcelle expérimentale est instrumentée afin d'effectuer un suivi des paramètres hydroclimatiques et des teneurs en CO_2 à différentes profondeurs. Des périodes de recharge (accumulation) et de vidange (émanations vers l'atmosphère) du CO_2 de l'épikarst superficiel sont démontrées tout comme la constitution d'un stock de CO_2 peu variable dans l'épikarst subsuperficiel. La compréhension de ces différents mécanismes aboutit à un schéma général de la dynamique du CO_2 dans l'épikarst.

Cette dynamique est étudiée dans la Grotte de Lascaux au cours d'une seconde partie à partir des séries temporelles des paramètres microclimatiques et des teneurs en CO_2, mais aussi du signal isotopique en ^{13}C. Il est alors démontré que les flux de CO_2 entrant dans la cavité proviennent de trois origines distinctes : l'atmosphère (entrée), l'épikarst superficiel (Galerie Mondmilch et Salles Ensablées) et le massif (éboulis du Puits du Sorcier). Parallèlement, deux régimes aérologiques responsables de la répartition spatio-temporelle des teneurs en CO_2 dans la cavité sont observés : stratification et thermoconvections. Ils sont les principaux responsables de la dynamique du CO_2 dans la Grotte de Lascaux du fait des faibles échanges entre cette dernière et l'atmosphère comparativement à d'autres cavités karstiques de la région. Enfin, l'impact du dispositif du pompage de l'air sur l'aérologie et la dynamique du CO_2 dans la Grotte de Lascaux est évalué. La comparaison de ces dynamiques avec et sans extraction de l'air de la cavité conduit à la création de schémas conceptuels de la dynamique du CO_2 dans la Grotte Lascaux.

L'étude des conditions d'écoulement dans l'épikarst de la Grotte de Lascaux, troisième partie de ces travaux, a été effectuée à partir d'un suivi en continu des débits, paramètres physico-chimiques et de la fluorescence naturelle de l'eau. L'analyse des séries temporelles de ces traceurs naturels conduit caractériser de façon détaillée les conditions d'écoulement et notamment l'importance de la teneur en eau de l'épikarst sur la taille zone d'alimentation et les types d'eau arrivant à l'exutoire. Parallèlement, l'impact de ces conditions d'écoulement sur les équilibres calco-carboniques des eaux arrivant dans la cavité est analysé.

Enfin, les connaissances acquises sont appliquées pour déterminer l'impact potentiel en continu des eaux (condensation et exfiltration) présentes aux parois ornées de la cavité. A cette fin, une méthodologie d'estimation de la masse de calcite potentiellement précipitée par les eaux d'exfiltration et dissoute par les eaux de condensation basée sur des simulations hydrogéochimiques est développée. Son application à la paroi gauche de la Salle de la Taureaux en contextes de pompage et naturel conduit à l'évaluation de l'impact potentiel du pompage mais aussi de l'aérologie de la cavité sur la conservation des parois.

Mots clés : Karst, Epikarst, Cavité, Dioxyde de Carbone, Monitoring en continu, Aérologie, Lascaux,