

L'AVEN D'ORGNAC

SUIVI ENVIRONNEMENTAL ET MODÈLE DE FONCTIONNEMENT ACTUEL DU MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

par François BOURGES¹, Alain MANGIN²,
Pierre GENTHON³, Dominique D'HULST² et Françoise GAUQUELIN⁴

1 Géologie-Environnement-Conseil, St-Girons

2 Laboratoire de Moulis, CNRS, St-Girons

3 IRD Hydrosociences, Maison des Sciences de l'Eau, Montpellier

4 Ministère de l'Écologie, du développement et de l'aménagement durables, CERTU, Lyon.

Exploré en 1935 par Robert de Joly accompagné de l'abbé A. Glory, de J. Latour, A. Petit et F. Chagnard, l'aven d'Orgnac est une grotte touristique qui fait partie d'un réseau de cavités karstiques classé initialement au titre des sites en 1946 puis en 1974 après les découvertes des nouveaux réseaux par les équipes de Guy Rieu et Jean-Charles Trébuchon.

Dans les années 1990, des installations d'accueil obsolètes et une gestion difficile font apparaître la nécessité d'une requalification du site touristique. Avant toute conception de projet apparaissait la nécessité de lancer une étude sur le milieu souterrain. Ce travail d'étude sur les problèmes d'aménagement et l'impact des travaux a été initialement commandé à l'initiative de la DIREN, en 1996, au bureau d'étude Géologie Environnement Conseil associé au Laboratoire souterrain de Moulis. Cette collaboration, augmentée récemment de l'IRD, se poursuit sur le site depuis cette époque, accompagnant successivement les phases d'étude initiale (rendu 1998) et complémentaire (rendu 1999), le contrôle des travaux (2000-2001), le suivi après modifications, une Opération Grand Site (2000-2004) à laquelle contribue également l'équipe du laboratoire EDYTEM de l'Université de Savoie, et un projet de classement de la surface (actuellement en cours).

Cet article présente les thèmes abordés par notre équipe dans le travail de suivi et d'étude sur l'aven d'Orgnac et les replace dans le contexte d'accompagnement de l'aménagement et de la valorisation d'un site souterrain exceptionnel.

Les études sur l'aven d'Orgnac ont été réalisées sur la base d'un objectif de compréhension du fonctionnement actuel du milieu naturel. La mesure des impacts et l'évaluation des risques, par l'identification des

sensibilités particulières du milieu, est nécessaire à sa préservation et à la bonne gestion du site. La meilleure connaissance du système naturel karstique permet également de valoriser un patrimoine naturel et culturel en améliorant la qualité de sa présentation au public.

Les opérations consistent principalement en un suivi environnemental actif depuis maintenant un peu plus de dix ans sur le site de l'aven d'Orgnac. L'outil technique principal est un système de stations de mesures et de capteurs mesurant en continu les paramètres pertinents du milieu souterrain (*températures dans l'air et en paroi en divers points du site, pression barométrique, concentrations en CO₂, en radon 222, humidité relative, piézométrie dans un forage situé dans le secteur*) et ceux de l'atmosphère de surface (*température de l'air, pluviométrie, pression barométrique*). Les mesures sont enregistrées au pas du quart d'heure. Les données acquises ont été complétées par des mesures ponctuelles pour acquérir de l'information spatiale (profils en CO₂ et O₂ le long de la cavité) et par des expérimentations complémentaires (mesures des concentrations en CO₂ dans le sol pendant une année, expérimentations sur profils thermiques verticaux dans la Salle Plane et dans la Salle de Joly, jaugeage différentiel de la Cèze, mesures de débits d'air et de CO₂ aux entrées naturelles et artificielles du site, expérience de ventilation forcée dans la zone confinée du Canyon). À ce jour, plus de 2 millions de données numériques ont été archivées.

L'interprétation des données acquises lors du suivi et des expérimentations ont permis de mettre au point et d'affiner au cours des années un modèle de fonctionnement de l'ensemble du système karstique d'Orgnac sur des bases qualitatives et quantitatives. Ce modèle permet d'évaluer les propositions d'aménagement en fonction des sensibilités du milieu.

En septembre 2002, une pluie centennale de l'ordre de 400 mm a provoqué, le lendemain, une inondation des cavités profondes rappelant brutalement l'existence d'une composante hydraulique dans le fonctionnement actuel. La nouveauté de certains résultats a fourni matière à publications dans des revues scientifiques (Bourges et al., 2001, Bourges et al., 2006) et a fait l'objet de communications en congrès (Bourges et al., 1998, 2003, 2005).

Dans cet article, après avoir rappelé les propriétés du milieu karstique et les approches adoptées, nous abordons le problème des transferts du CO₂ dans le cadre de la faisabilité de l'opération de réaménagement du site. Un schéma de fonctionnement naturel des cavités de l'aven d'Orgnac est ensuite exposé, il donne une vision globale des phénomènes d'échanges et précise leur localisation, il est utilisé comme modèle pour le suivi et le contrôle des travaux en surface et de fonçage du puits d'ascenseur. La réalisation d'expérimentations complémentaires dans différentes parties du réseau dans le cadre d'une Opération Grand Site a complété un modèle thermique et permis de généraliser le modèle d'échange. Les observations après la pluie centennale de septembre 2002 ont ouvert un champ de réflexion nouveau avec l'instrumentation de la zone noyée permettant une description et une analyse du fonctionnement de toutes les parties du système karstique d'Orgnac.

I - PROPRIÉTÉS ET APPROCHE DU MILIEU SOUTERRAIN KARSTIQUE

Le système naturel qui héberge l'essentiel du patrimoine souterrain est le karst. Il s'agit d'un ensemble de morphologies développées à l'échelle des temps géologiques dans des formations calcaires par les dissolutions et précipitations chimiques résultant d'un drainage essentiellement souterrain des eaux. Le fonctionnement d'un karst actuel peut être décrit en termes de transferts de matière et d'énergie depuis la surface, au travers d'une zone d'infiltration (qui héberge les cavités accessibles) puis dans une zone noyée vers un exutoire final.

À cause de discontinuités de la roche élargies par la dissolution, les grottes des systèmes karstiques échangent des gaz et de l'eau avec le milieu extérieur au travers des réseaux de vides de tailles variées. Ces vides de petite taille sont appelés réseau macrofissural et microfissural (Mangin, 1995). Les réseaux de macrofissures sont le résultat de dissolutions à partir de discontinuités initiales (fractures, fissures ou joints) et sont caractérisés par des ouvertures millimétriques à centimétriques. Ces réseaux sont soit colmatés par des sédiments, particulièrement dans des systèmes karstiques comprenant différents niveaux, soit ouverts, assurant alors le transfert rapide de gaz entre les grands

vides souterrains des grottes et l'atmosphère extérieure ainsi que l'infiltration des eaux météoritiques durant les forts événements pluvieux. Au contraire, le réseau microfissural est constitué par les fissures initiales de la roche avec des ouvertures inférieures à 1 mm. À cause des tensions superficielles et de l'étranglement des ouvertures, le réseau microfissural est soumis à des écoulements diphasiques permettant le transfert vers le bas de l'eau de pluie et de l'air du sol enrichi en CO₂ vers les différentes grottes et vers l'aquifère. Ainsi, la taille du système naturel est largement plus importante que le volume de la grotte, tandis que les différents niveaux d'énergie et de flux dépendent des types de vides, de leurs positions dans le système karstique et aussi de la grande variabilité des conditions locales en surface. Ceci amena notre équipe à utiliser d'abord une approche systémique basée sur l'analyse des flux de matière et d'énergie (Mangin, 1984) sans s'interdire une approche physique plus classique s'agissant de processus actifs dans les microclimats souterrains.

II - LES COMPOSITIONS DES ATMOSPHÈRES SOUTERRAINES

Le confort et la sécurité des personnes dans un site souterrain touristique sont dépendants de la qualité de l'air qu'on y respire. Ainsi, la présence de gaz carbonique dans l'atmosphère de l'aven d'Orgnac et le questionnement sur son origine, sur l'évolution saisonnière ou à plus long terme des concentrations fut un thème majeur de l'étude d'impact initiale.

Le projet envisageait une extension de l'aménagement souterrain au bas des Salles Rouges. L'instrumentation initiale ciblait donc les zones du Balcon des Salles Rouges et du Canyon qui sont les parties les plus profondes et facilement accessibles de cette zone.

Les résultats de la première année de suivi montrèrent un comportement singulier de la zone du Canyon des Salles Rouges avec des abaissements quasi instantanés de la concentration en CO₂ et des remontées progressives des valeurs jusqu'à des niveaux de 3,5 à 4 %. Ce fonctionnement fut interprété par des vidanges aérodynamiques successives du Canyon en période d'hiver lorsque de l'air souterrain était remplacé par de l'air directement venu de l'extérieur (figure 1). La réalisation de profils le long de la cavité, la visualisation d'une interface aérodynamique par des fumigènes et un suivi ultérieur simultané en radon et CO₂ (figure 2) confirmèrent que la zone du Canyon se comportait comme un compartiment confiné de la cavité qui s'ouvrait occasionnellement à l'influence extérieure.

La question de l'origine de ce gaz et des concentrations mesurées dans le Canyon restait problématique. Nous n'avons identifié aucune influence des visites touristique sur la teneur en CO₂ de l'air souterrain dans l'aven ; de plus, du CO₂ en teneur comparable était

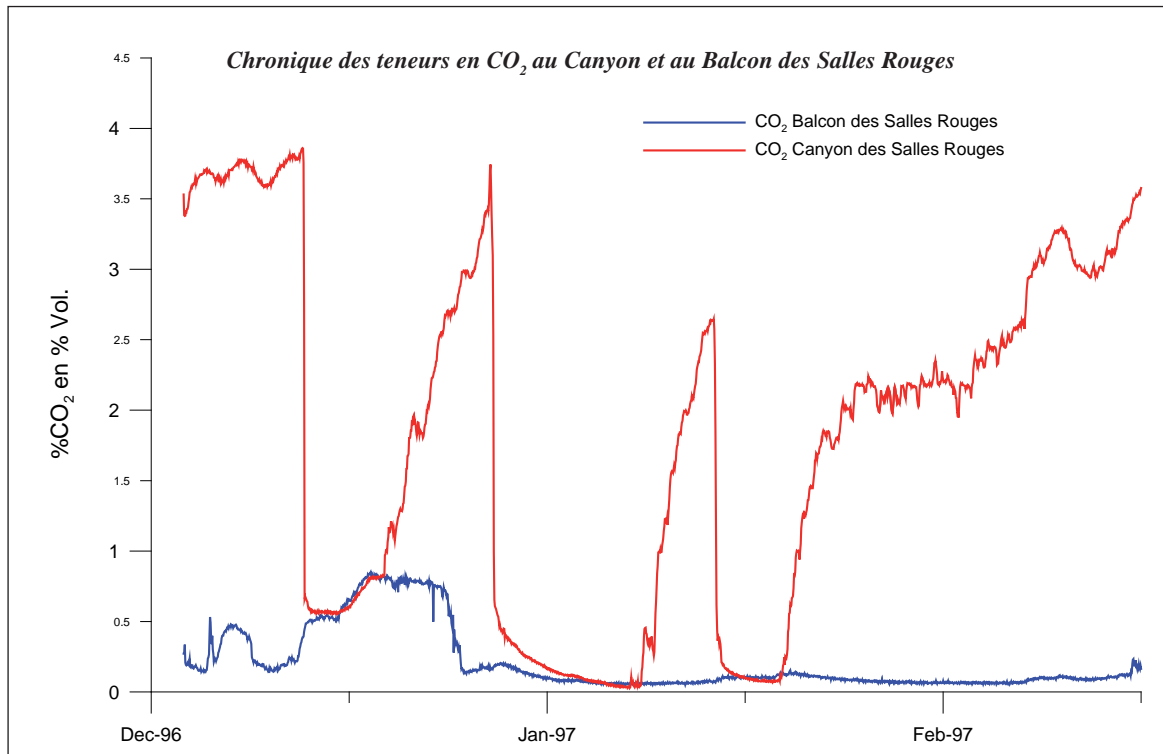


Figure 1

L'enregistrement de l'évolution des concentrations en CO_2 dans le Canyon des Salles Rouges montre une succession de vidanges et de remplissages d'un compartiment confiné. Les vidanges sont le résultat d'un phénomène aérodynamique instantané d'ouverture, les remplissages se font à vitesse à peu près constante et permettent de calculer un flux moyen de CO_2 .

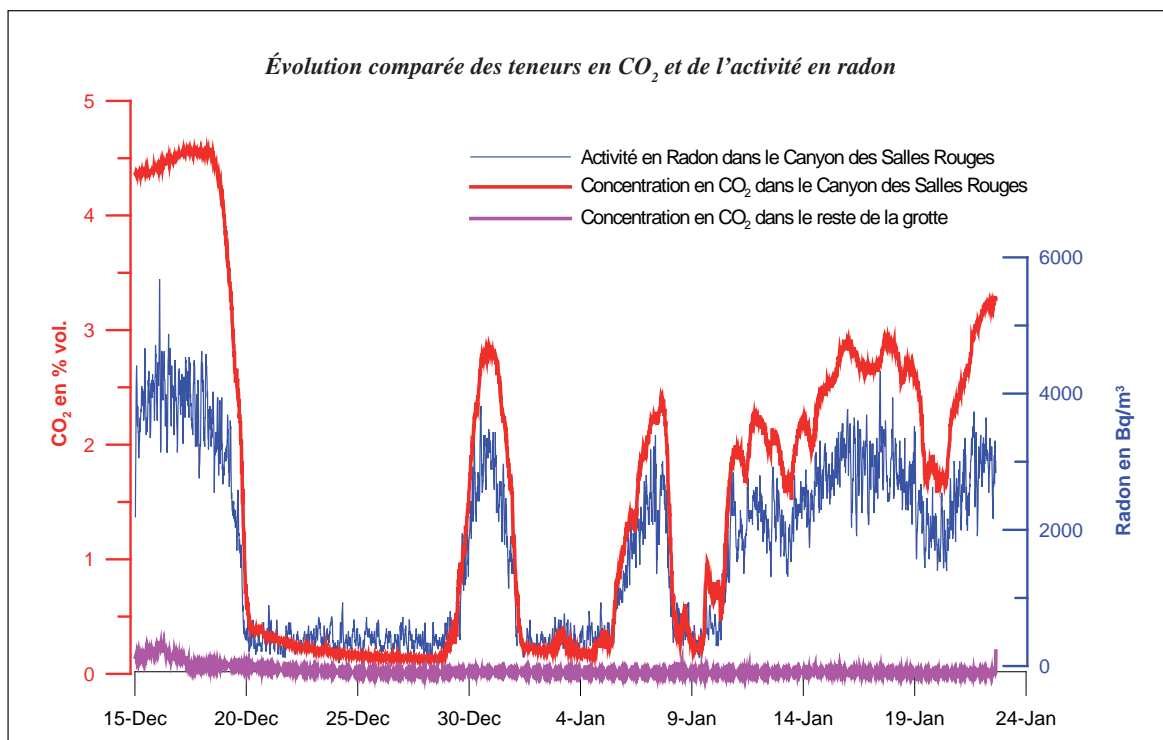


Figure 2

En 2004, les enregistrements du radon et du CO_2 témoignent des successions de conditions de confinement et ouvertures de l'atmosphère du Canyon. Notons que cette année le caractère progressif de ces vidanges indique que des phénomènes comme la diffusion au travers d'une interface pourraient également être actifs dans l'évolution du compartimentage aérodynamique.

également présent dans l'atmosphère des nouveaux réseaux et dans d'autres grottes voisines en l'absence de toute fréquentation humaine. L'analyse des isotopes de l'hélium (^3He , ^4He) permet d'éliminer une arrivée de gaz profond ; l'analyse des isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) indiquait que le carbone du CO_2 était essentiellement d'origine biogénique. La diminution de l'oxygène corrélativement à l'augmentation du CO_2 dans l'air souterrain dans un rapport mole à mole identifiait un phénomène analogue à une combustion ou à une respiration.

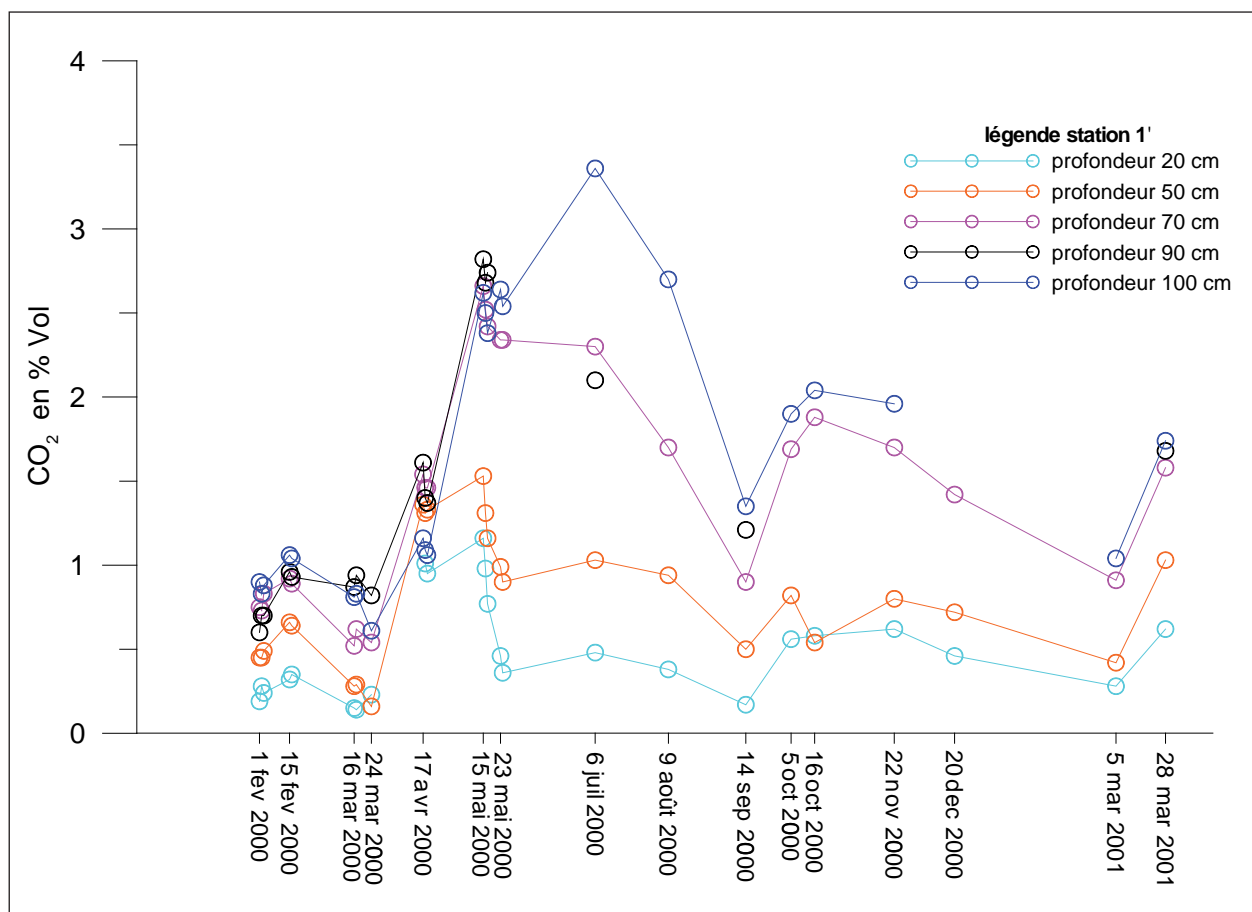
L'hypothèse de l'origine de ce CO_2 dans les sols en surface a donc été émise et testée. Nous avons tubé et équipé une zone de surface près de l'aven pour suivre sur une année les compositions de l'air du sol à différentes profondeurs. Des concentrations volumiques en CO_2 similaires à celles des zones profondes des grottes ont été identifiées en base de ce sol (figure 3). Une estimation à $0,004 \text{ l/s/m}^2$ du flux de CO_2 pur arrivant dans la grotte au travers de la roche a été réalisée à partir des données de vitesse de remplissages du canyon et des surfaces potentiellement productives. Un

calcul permet d'extrapoler la production de CO_2 pour l'ensemble de la cavité (1,9 tonnes/jour). La mesure des quantités de CO_2 expulsé en été à l'ouverture naturelle a confirmé pour l'ensemble de la cavité les ordres de grandeur de la production (entre 0,5 et 4 tonnes de CO_2 pur par jour). Ces valeurs sont importantes par rapport à celles potentiellement émises par les visiteurs même en haute saison touristique et expliquent que leur impact n'est pas visible dans la chronique du CO_2 de l'air de la grotte.

Malgré une tendance à la hausse sur le long terme, les concentrations maximales atteintes dans l'aven (2,5 %) restaient inférieures à celles des parties confinées. Cette différence est attribuée à la présence de fissures ouvertes permettant des dilutions de l'air souterrain par l'arrivée d'air extérieur dans certaines parties du volume de la grotte. Les sections cumulées calculées pour ces fissures sont très faibles ($0,78 \text{ m}^2$ pour la ventilation des Salles Rouges hors Canyon) et peuvent facilement être colmatée par des aménagements impliquant une sensibilité de l'état de surface. L'analyse indiquait aussi qu'un confinement artificiel

Figure 3

En 2000 et 2001, un dispositif de tubes drainant de l'air souterrain à des profondeurs différentes du sol montrent une évolution des teneurs de plus en plus élevées avec la profondeur et une évolution saisonnière des concentrations.
 Notons que les concentrations volumiques maxima en CO_2 obtenues en base de sol correspondent à celles de l'atmosphère des cavités souterraines en situation de confinement souterrain.





Photos 1
Station de mesures
 (température, hygrométrie,
 teneur en CO₂) installée
 dans la Salle de Joly
 (photos Françoise Prud'homme).



de la cavité responsable de teneurs croissantes en CO₂ dans l'air souterrain pouvait avoir été provoqué par la diminution de la section de l'entrée naturelle par une plateforme et par l'extension progressive des zones étanches au-dessus des cavités (parkings, bâtiments nouveaux) qui a pour effet de diminuer les transferts hydriques et aérodynamiques. À cause du ralentissement du transit, la dégradation de la matière organique serait favorisée par un temps de séjour plus long dans le réseau fissural (Wood, 1985).

Un aménagement des parties les plus profondes (Salles Rouges) a ainsi été déconseillé en raison principalement du risque de concentrations élevées en CO₂ naturellement persistantes. Les visites régulières en randonnées spéléologiques encadrées avaient été déclarées possibles mais pourraient être compromises

certaines années (c'est le cas en été et automne 2007) où les concentrations dépasseraient naturellement les 3 %, valeur considérée comme critique pour la sécurité des personnes (cf. arrêté préfectoral).

Enfin, la description du fonctionnement naturel du site souterrain rejoint l'activité de recherche sur les paléoclimats fortement motivée par la perspective d'un changement climatique. En effet, les concrétions de grottes sont devenues des jalons fondamentaux dans ce travail de reconstitution car elles constituent les meilleures archives des conditions continentales passées. La mise en évidence dans le Canyon de l'aven d'Orgnac d'un contrôle aérodynamique très net des concentrations en CO₂ de l'atmosphère souterraine identifie une contrainte physico-chimique forte dans le dépôt des lamines de calcite des spéléothèmes.

III - UN MODÈLE DYNAMIQUE DE TRANSFERT DES FLUIDES.

Dans la perspective d'une requalification globale du site (incluant le réaménagement complet des installations de surface et le fonçage d'un puits vertical de 120 mètres

rejoignant les Salles Rouges), la mise au point d'un modèle global de fonctionnement naturel prenant en compte la géométrie de l'aven était nécessaire pour identifier et présenter les recommandations en vue de la préservation du milieu souterrain. Un schéma de circulation des fluides (air et eau) a été mis au point

Figure 4a

Le régime d'échange de l'aven d'Orgnac se caractérise par l'infiltration d'eau et d'air à partir du sol. L'été, l'air souterrain en provenance du sol (flèches jaunes) est drainé par les cavités et expulsé vers l'extérieur; l'eau poursuit son trajet vers la profondeur; une ventilation peut cependant se produire par les macrofissures (flèches bleues). La présence de zones étanches ralentit la dynamique des infiltrations.

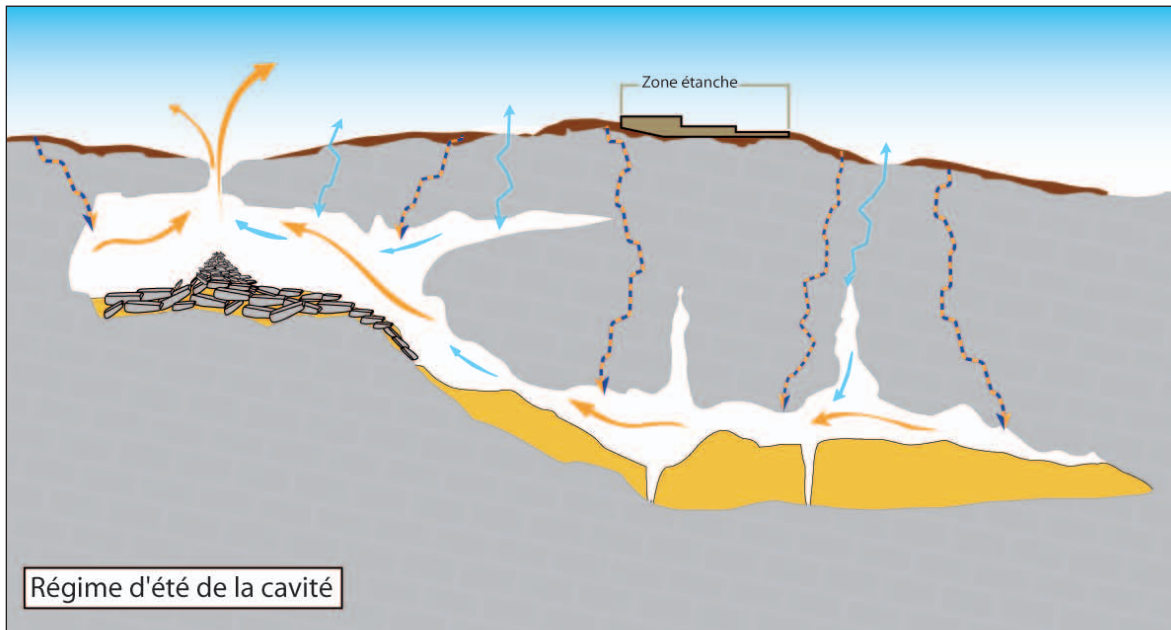
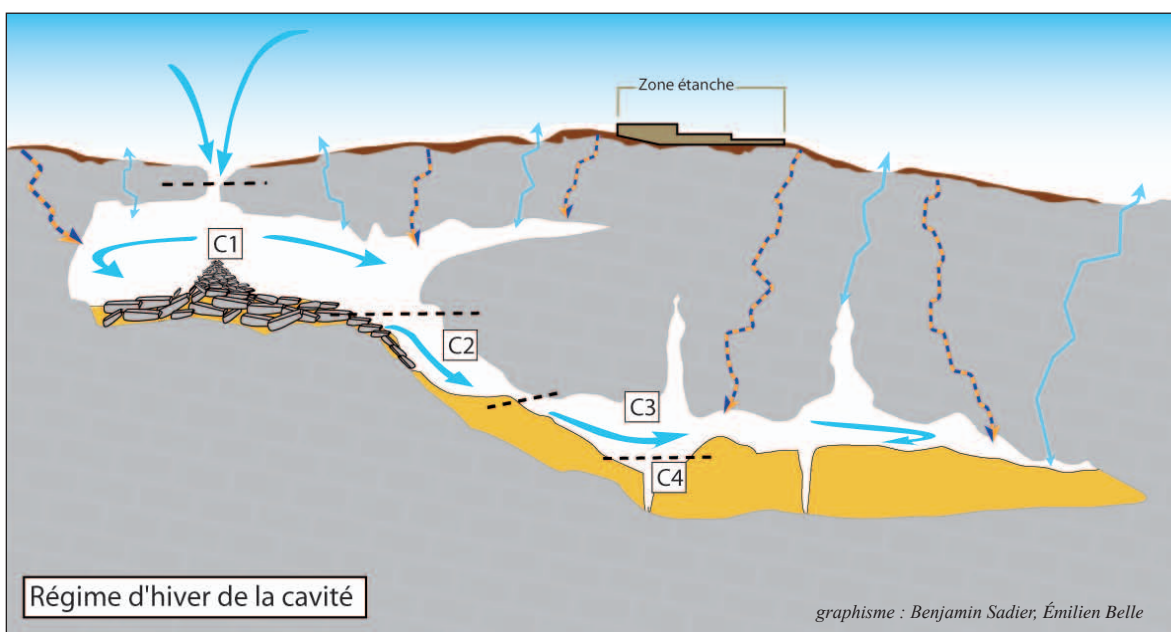


Figure 4b

Le régime aérodynamique d'hiver se caractérise par l'entrée d'air extérieur par les entrées naturelles. Ces arrivées (flèches bleues) viennent diluer l'air souterrain et ouvrent l'espace souterrain à l'influence de l'extérieur. Cet effet est tamponné par des rééquilibrages thermiques très actifs et limité par le compartimentage aérodynamique de la cavité qui n'ouvre que progressivement les segments de grotte à l'influence extérieure (les limites des compartiments C1 à C4 sont représentées en pointillés).



graphisme : Benjamin Sadier, Émilien Belle

puis progressivement affiné pour aboutir à un modèle de transfert quantifié et cohérent intégrant l'ensemble des paramètres du milieu (figures 4a et 4b).

L'atmosphère souterraine de l'aven d'Orgnac est marquée par une forte saisonnalité avec un régime d'été où l'air souterrain (riche en CO_2 , en radon, appauvri en O_2 , quasiment saturé en humidité et stable thermiquement) occupe la totalité des grands vides. Cet air souterrain est produit au niveau de l'interface rocheuse après un transfert diphasique avec l'eau depuis le sol au travers des microfissures du karst puis drainé par les cavités et expulsé aux ouvertures naturelles. Le flux supposé constant est mesuré en sortie de l'aven : 60 000 à 160 000 m^3 d'air enrichi en CO_2 sont expulsés chaque jour de la cavité. Ce fonctionnement à flux constant détermine une grande homogénéité de la qualité de l'atmosphère, il est qualifié de confinement souterrain. En début d'hiver au contraire, lorsqu'un seuil de température (T° inférieure à 10°C) est franchi pendant les premières nuits froides, le confinement de la première salle disparaît. Les dilutions du CO_2 et du radon jusqu'à des valeurs proches de l'atmosphère extérieure, la baisse de l'humidité concomitante et le changement de régime thermique signalent une arrivée d'air extérieur. Les profils thermiques verticaux montrent qu'un phénomène thermo-convectif se met en place après une brisure de l'interface entre les deux milieux lorsque la densité de l'air extérieur dépasse la densité de l'air intérieur. Les entrées d'air froid par

l'aven ont été identifiées sur des profils thermiques dans la Salle de Joly et quantifiées par des mesures de débit d'air entrant (estimé de 100 000 à 500 000 m^3/jour). Le déconfinement du milieu se produit d'abord dans la Salle de Joly mais se poursuit par l'ouverture successive de compartiments plus profonds jusqu'au Canyon des Salles Rouges, les limites de compartiment s'installant sur des singularités géométriques du réseau. Notons que certains sites comme la grotte Chauvet (figure 4c) ou les parties lointaines du réseau peuvent ne jamais se déconfiner (figure 5).

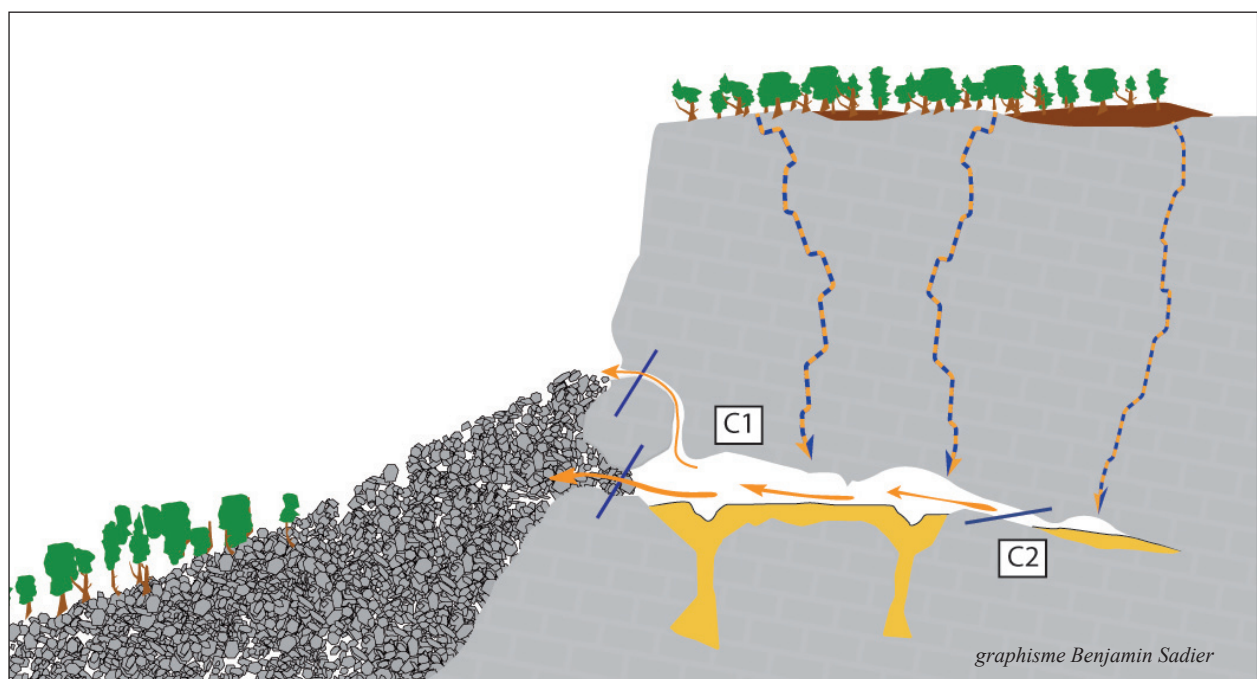
Le projet d'ascenseur accédant directement au Balcon des Salles Rouges devait éviter, en fin de visite, la pénible remontée des 120 mètres de dénivellation par les touristes dans une atmosphère enrichie en CO_2 . Le fonçage du puits d'ascenseur de 123,5 m pour 8 m de diamètre, puis d'un tunnel horizontal pour accéder dans l'aven d'Orgnac au Balcon des Salles Rouges, était l'opération la plus importante mais aussi la plus risquée de l'aménagement du site. Le risque était d'abord de rencontrer un vide important (un sondage de reconnaissance avait été effectué antérieurement), c'était aussi la déstabilisation générale du microclimat souterrain.

Cette opération nous avait paru compatible avec la préservation du milieu à condition que l'aménagement laisse les Salles Rouges en l'état et que, lorsque le percement serait effectué, les échanges d'air soient immédiatement parfaitement contrôlables par des

Figure 4c

Schéma de fonctionnement d'une cavité du type de la grotte Chauvet.

Le confinement souterrain y est permanent ; la ventilation est unidirectionnelle et générée par l'écoulement diphasique d'air et d'eau à travers les microfissures de la zone d'infiltration du karst. Un compartimentage stable sépare la zone du fond où l'air est toujours plus riche en CO_2 que dans le reste de la cavité.



graphisme Benjamin Sadier



systèmes de sas. L'impact des travaux était suivi par les paramètres de composition et de température de notre installation de mesure. La société SOTRABAS contrôlant elle-même les vibrations lors des tirs dans le puits (photos 2).

L'activité de ces phénomènes d'interface avec le milieu souterrain et les volumes d'air impliqués dans la dynamique justifient les recommandations de contrôle des échanges par un sas et de réalisation du débouchage en situation de contraste thermique faible entre la grotte et l'extérieur. Le suivi en composition et en température a permis de vérifier que, lorsque le tunnel débouche dans la grotte le 31 mai à 20 heures et les jours suivants, aucun phénomène violent susceptible de modifier les conditions souterraines ne s'est produit dans les cavités souterraines (figures 6 et 7). Ainsi la connaissance de la dynamique de fonctionnement permettait de contrôler, grâce au suivi, l'impact réel de cet aménagement.

Photos 2

Le puits d'ascenseur en cours de percement.

Profond de 125 m et de 8 m de grand diamètre, ce puits a été équipé de deux cabines. Il rejoint les Salles Rouges par une galerie horizontale (ci-dessous). Les déblais extraits ont été réutilisés sur le Site pour l'aménagement de jardins en terrasses (photos 2a et 2c : Françoise Prud'homme).



Figure 6

Suivi thermique dans la zone de percement.

Les capteurs qui étaient situés dans la zone même du débouché du tunnel ont été déplacés quelques jours avant le percement, ce déplacement a modifié la porteuse du capteur de paroi T3, et le régime pour le capteur T2 situé dans l'air. L'effet du percement ultérieur est nul pour les capteurs non déplacés et négligeable pour les capteurs déplacés qui se trouvent au plus près de l'entrée du nouveau tunnel.

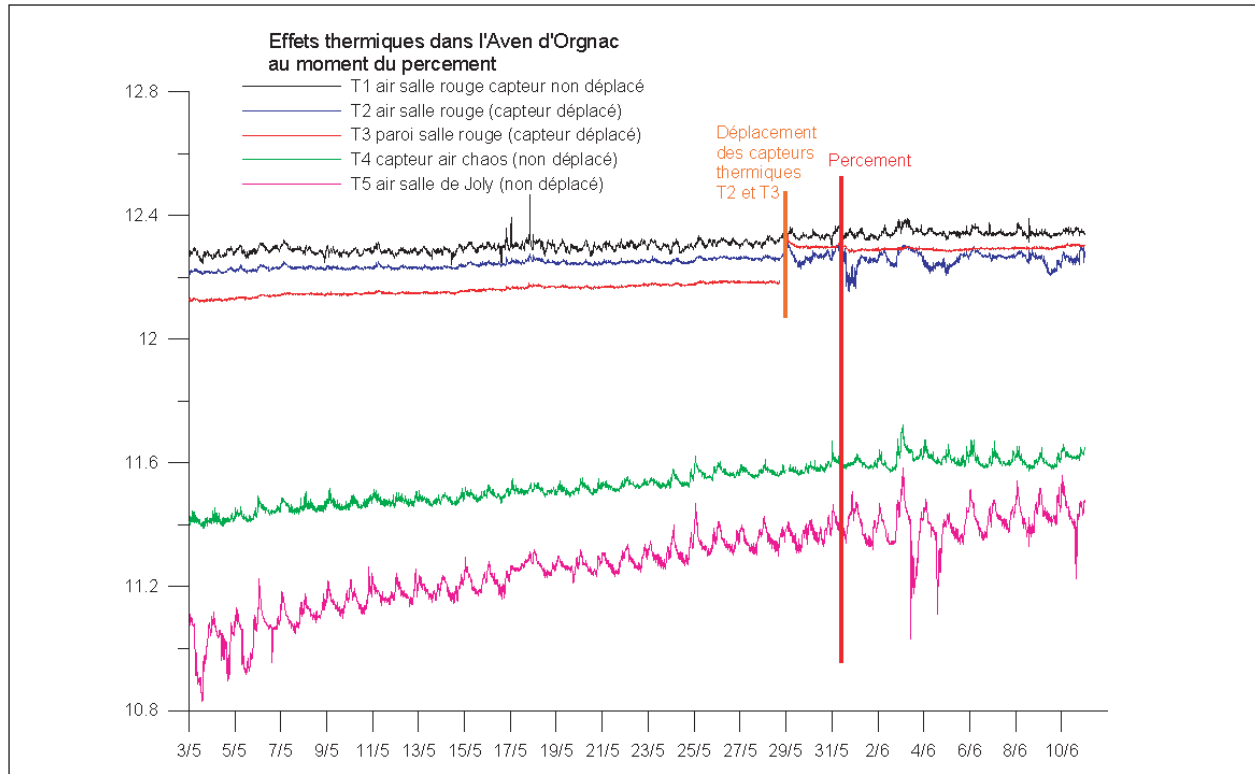
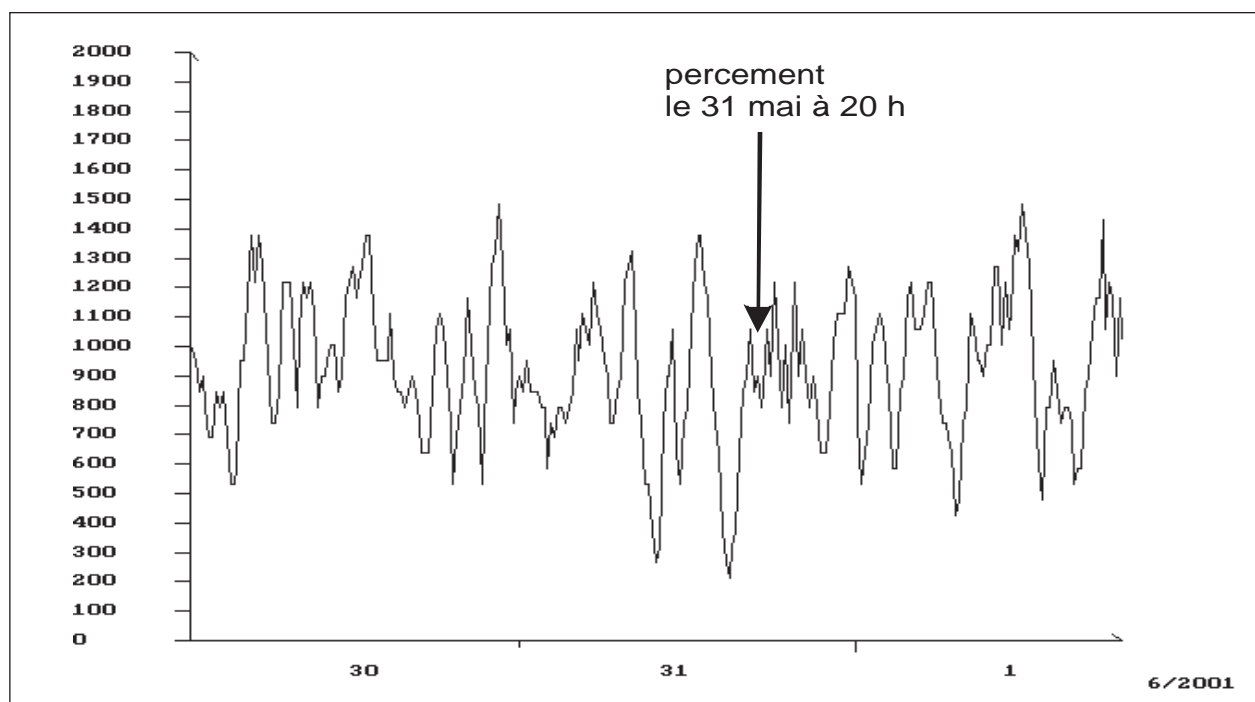


Figure 7

Suivi des concentrations en radon au Balcon des Salles Rouges.

La stabilité de la concentration en ^{222}Rn et du régime de ses variations indiquent que le percement du tunnel n'a produit aucun impact significatif sur le confinement ni sur le fonctionnement aérodynamique du site. Seule une modification sur quelques heures du régime des variations est observée au moment où le tunnel débouche.



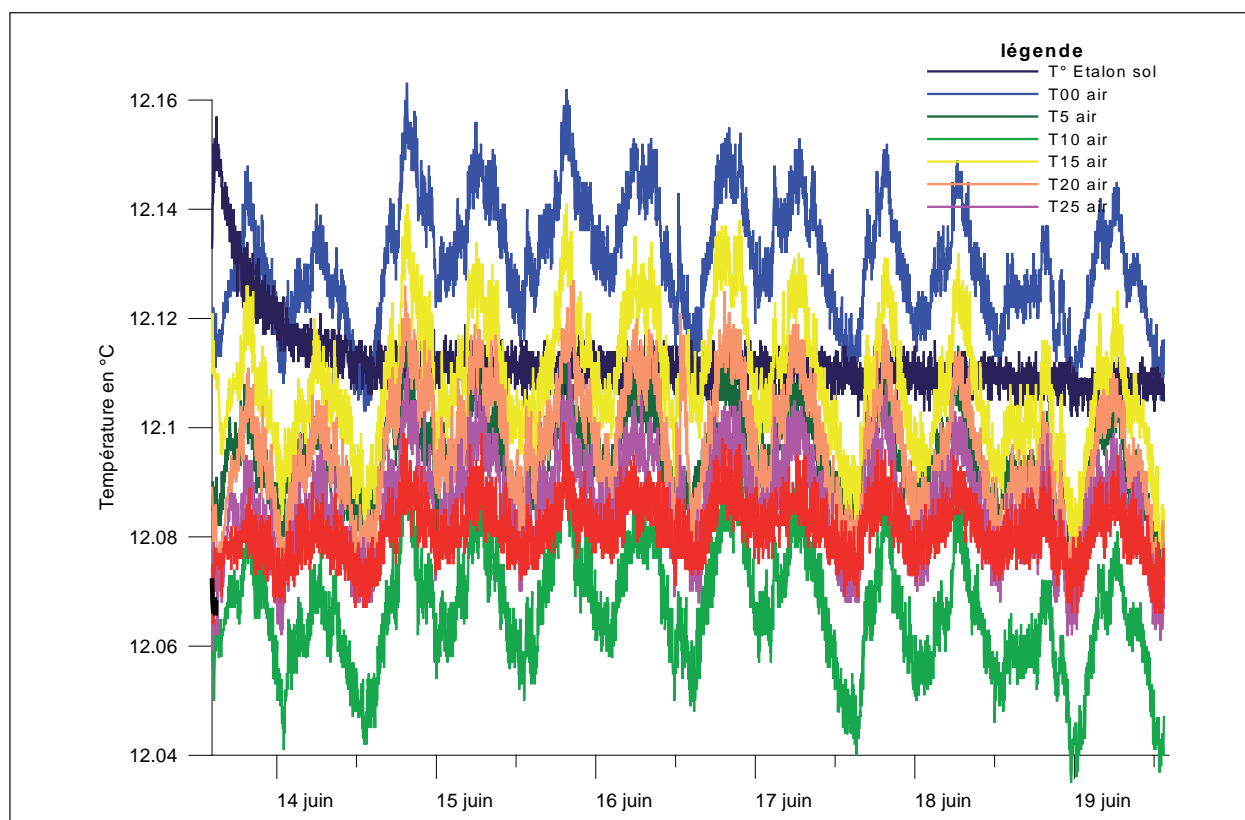
IV - LES PHÉNOMÈNES DE RÉGULATION THERMIQUE, UNE CLÉ DE LA CONSERVATION.

La recherche des phénomènes conservatoires du milieu souterrain impliquant la thermique fut un thème principal des travaux sur l'aven d'Orgnac dès l'origine, puis au cours de l'Opération Grand Site. Le problème de l'impact thermique des visites et des risques de déstabilisation du milieu fut abordé le premier ; ultérieurement, le travail s'est poursuivi par l'identification *in situ* des phénomènes de régulation thermique et l'analyse des signatures thermiques contrastées dans les différentes parties de la grotte.

Le première analyse consistait à vérifier l'impact de la fréquentation. La corrélation entre les visites et la température n'apparaît pas dans les zones visitées de la grotte au-delà de la Salle de Joly. Dans cette salle en revanche, la relation est très nette sur le très court terme, elle est interprétée comme l'effet direct du passage des visiteurs dans la zone du capteur et non comme un impact thermique affectant cette partie de la cavité. Le réalisation d'un profil thermique en été a confirmé que l'impact thermique journalier des visites, même en haute saison, était rapidement et complètement effacé dans les heures de fermeture et que de ce point de vue le site n'était pas surfréquenté.

La description fine du fonctionnement naturel complexe de la Salle de Joly et, plus largement, des phénomènes à l'interface entre le milieu souterrain et l'extérieur était l'objectif du redéploiement de l'instrumentation en 2003. En automne, lors des ouvertures aérodynamiques des compartiments supérieurs à l'influence extérieure, l'importance des volumes d'air entrés dans la grotte (mesurées entre 100 000 et 500 000 m³/jour) explique les dilutions instantanées en CO₂ et radon. Cependant, dans la Salle de Joly, malgré des températures extérieures très basses, la température de l'air intérieur diminue de seulement 2°C en hiver. Ainsi, une interprétation thermoconvective des échanges implique des mécanismes d'amortissement très actifs des variations thermiques par le milieu souterrain. La condensation partielle de l'eau présente dans l'air de la grotte peut expliquer ce phénomène. Avec une chaleur latente de vaporisation de l'eau de 2,5.10⁶ Jkg⁻¹, une chaleur spécifique de l'air extérieur de 10³ Jkg⁻¹ C⁻¹, une différence de température de 7°C entre l'air extérieur froid et l'air intérieur saturé en eau et une pression de vapeur saturante de 1 400 Pa pour l'eau à 12°C, 100 000 m³ d'air froid entrant dans la grotte sont capables de condenser 350 kg d'eau, ce qui est une valeur modeste en comparaison des 3 300 kg d'eau contenue dans les 100 000 m³ d'air humide quittant la grotte chaque jour. Ce mécanisme pourrait aussi

Figure 8
Expérimentation thermique dans la Salle Plane des nouveaux réseaux.
Les capteurs ont été placés tous les 5 mètres par Stéphane Tocino sur une verticale de 30 mètres. Les températures présentent toutes une périodicité très nette à 12 heures, exceptée celle qui est prise dans le sol.

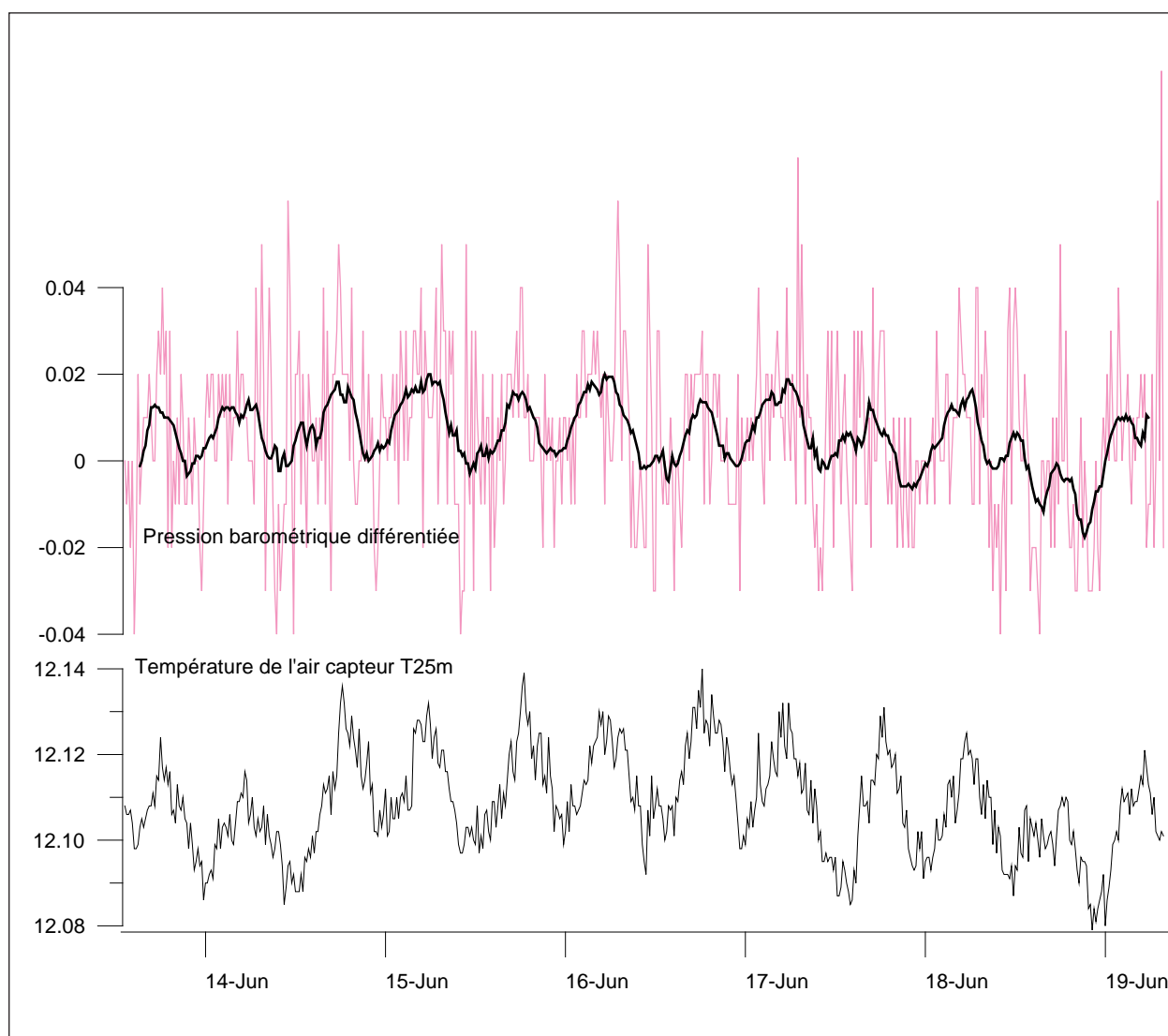


expliquer la grande quantité de brouillard observée en hiver dans la zone située au-dessous de l'entrée de la grotte. Cette eau condense sur le sol et sur les parois à l'aplomb de l'ouverture de l'aven. Comme cette eau est en déséquilibre chimique avec la roche (*De Freitas et Schmekal, 2003*), elle peut induire des dissolutions ou des précipitations en paroi. Ainsi, les secteurs placés à l'interface avec l'air extérieur pendant le régime d'hiver ne sont probablement pas compatibles avec la conservation à long terme d'éléments fragiles comme des peintures ou certains types de spéléothèmes. En revanche, la stabilité au-delà de la zone d'interface protège les parties aval des réseaux des chocs thermiques et diminue fortement les amplitudes saisonnières.

Les parties confinées des grottes contiennent souvent les objets naturels ou les vestiges archéologiques les plus fragiles : les mécanismes d'échange thermique

détectés dans ces zones apparaissent importants à décrire et à interpréter. Les amplitudes naturelles des variations y étaient de l'ordre du centième de degré avec des évolutions saisonnières de l'ordre du dixième de degré. Nous avons également remarqué une grande similarité dans les enregistrements thermiques des parties confinées de grottes différentes (grotte Chauvet et aven d'Orgnac) ; en revanche, dans le même site de l'aven d'Orgnac, différentes parties peuvent avoir des comportements thermiques très dissemblables. Un certain nombre d'enregistrements thermiques de suivi et d'expérimentations réalisés dans ces zones confinées présentaient une bonne corrélation quasi-instantanée (à l'échelle de notre pas de mesure) avec la dérivée première par rapport au temps du signal de pression barométrique (figures 8 et 9). Cette relation permet de reconstituer très finement les chroniques de

Figure 9
Comparaison entre les chroniques de l'un des capteurs de l'air (T25) de l'expérimentation de la Salle Plane (figure 8) et la dérivée première de la pression barométrique par rapport au temps (chronique brute et moyenne mobile).



température à partir de celles de la pression (figure 10). L'élimination par filtrage de ces composantes de la dérivée de la pression affectées d'un coefficient ne laisse sur la chronique de température qu'un résidu bruité indiquant qu'aucun autre effet physique attaché à des fonctionnements périodiques n'intervient dans ces zones. La physique de ce phénomène décrite par l'un d'entre nous (Pierre Genthon) indique que la relation entre la température mesurée et la dérivée première de la pression par rapport au temps correspond à un transfert thermique conductif de la chaleur produite ou absorbée lors des changements de pression vers le milieu rocheux réservoir infini à température fixe. Les échanges identifiés aux échelles de temps accessibles

par nos mesures signent un comportement isotherme du milieu souterrain.

Le phénomène est suffisamment clair et général à toutes les grottes confinées ou parties confinées de grottes de sorte qu'il est utilisable pour caractériser des conditions physiques considérées comme optimales pour la conservation en grotte.

Ce travail a permis de comparer le fonctionnement de l'aven, pris comme référence, avec celui de la grotte voisine de Chauvet et aux sites plus éloignés de Marsoulas (grotte ornée préhistorique), d'Esparros (site naturel, grotte à cristaux) ainsi qu'à des endroits plus exotiques du Pacifique sud-ouest comme la grotte de Thoubotr (Lifou, Iles Loyauté).

Figure 10
Amplitude de l'intercorrélation entre la dérivée de la pression et la température de l'air dans différentes parties de l'aven d'Orgnac montrant la persistance de la zone confinée dans les parties profondes (Salles Rouges) du site.

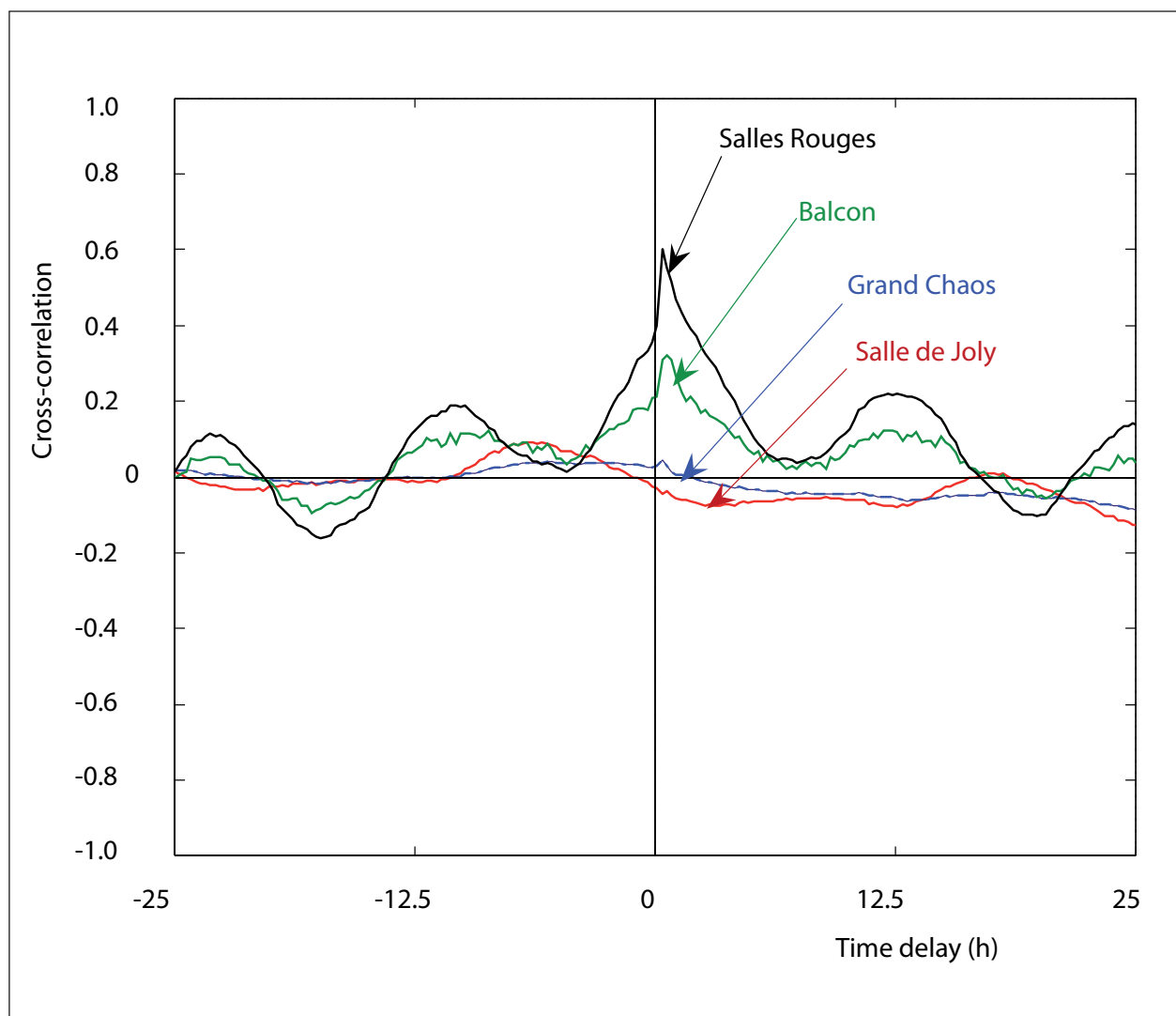
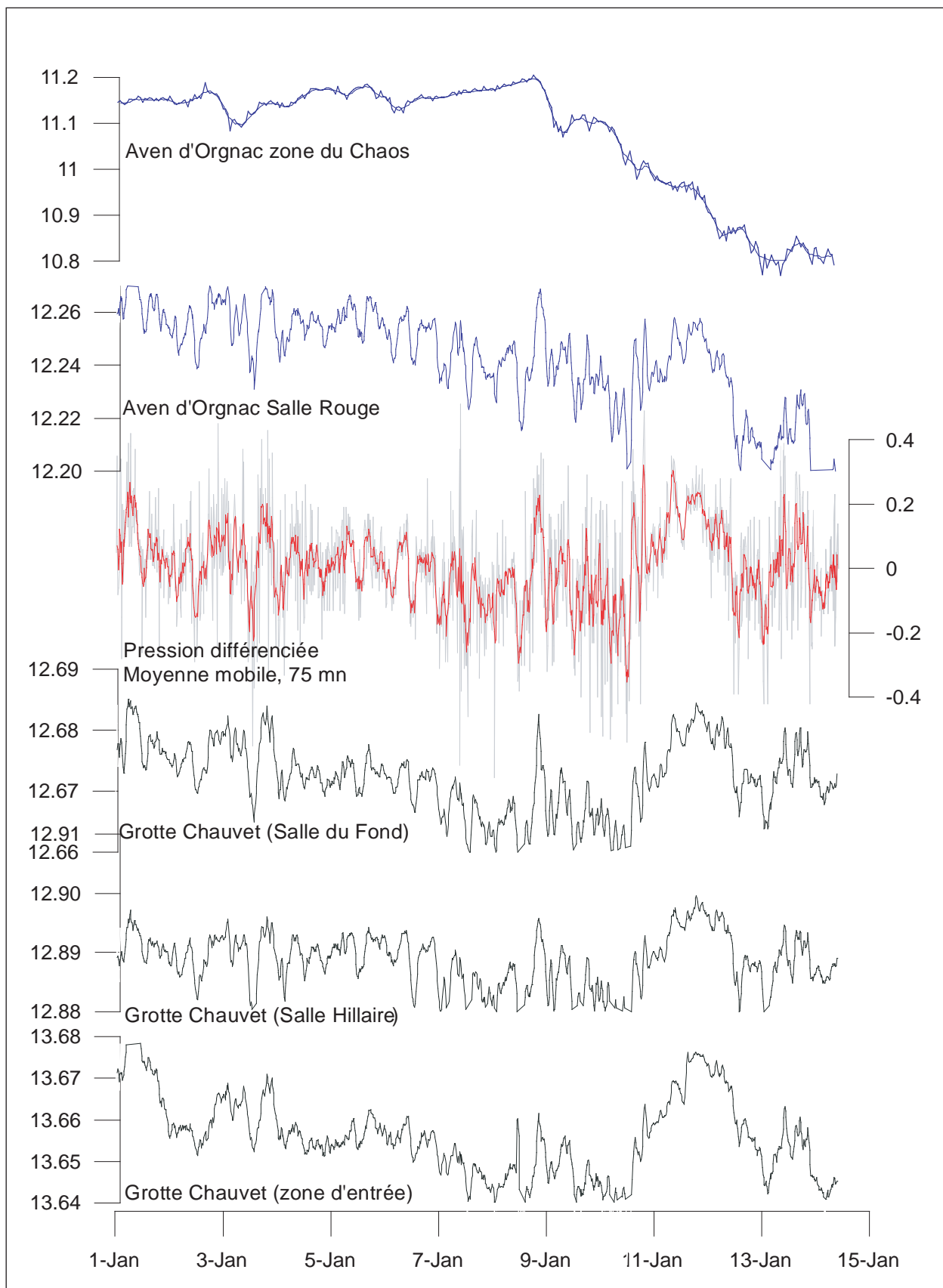


Figure 11
Comparaison entre les enregistrements des températures de l'air dans l'aven d'Orgnac et dans la grotte Chauvet avec la dérivée de la pression barométrique.
 Les parties confinées des sites (Salles Rouges d'Orgnac et totalité de la grotte Chauvet) montrent des chroniques de températures similaires à la dérivée de la pression barométrique.



V - LE FONCTIONNEMENT DE LA ZONE NOYÉE DU KARST D'ORGNAC ; IMPLICATIONS POUR LA COMPRÉHENSION DU SYSTÈME ACTUEL ET CONSÉQUENCES TECHNIQUES.

Les réseaux de cavités d'Orgnac étaient interprétés comme un paléokarst dont les morphologies et les remplissages témoignaient de fonctionnements et d'événements très anciens. Cependant un événement d'inondation, analysé comme une remontée de la zone noyée du karst, a ouvert un champ d'investigation nouveau sur le fonctionnement actuel et passé du site. Une pluie centennale de 390 mm tombée les 8 et 9 septembre 2002 en moins de 48 h a causé l'engorgement d'une partie des Salles Rouges sous 20 mètres d'eau (figure 12). Cette situation doit maintenant être aussi prise en compte dans l'aménagement et la gestion du site souterrain mais aussi dans la recherche d'information sur la zone noyée du karst. L'instrumentation d'un forage à 3,5 km au sud-est de l'aven, au lieu dit le Pavillon, de 106 m de profondeur et atteignant l'eau, permettait d'avoir des informations sur les eaux souterraines du secteur. L'analyse de la piézométrie du forage, équipé en septembre 2003 avec un capteur de pression et un enregistreur, confirmait le caractère karstique de l'aquifère. Une seule grande crue annuelle recharge

un aquifère à grande capacité de stockage, comme le montre l'effet mémoire qui s'atténue complètement sur une période de 35 à 40 jours. La relation pluie-débit montre un temps de régulation de l'ordre de 30 jours signant un système inertiel. Le déphasage de la relation pluie-débit (1,5 jours), le même que celui observé lors de la crue, étaye l'hypothèse d'un aquifère unique qui forme la zone noyée du système d'Orgnac et dont l'exutoire serait les fontaines de Monteil, en bordure de Cèze.

L'évolution du niveau d'eau dans le forage permet, grâce à l'étude des périodes de tarissement (apports nuls dans le réservoir), d'estimer l'importance des réserves de cet aquifère. Le modèle de Maillet qui utilise comme loi de vidange une fonction exponentielle permet de travailler uniquement sur la variation d'un paramètre qui suit la même évolution que celle des débits (ici la piézométrie mesurée au forage). Il suffit ensuite d'avoir une valeur du débit pour caler les résultats et calculer les volumes des réserves.

Comme les Fontaines de Monteil sourdent à proximité et dans le cours de la Cèze, il était difficile d'en mesurer directement le débit. Nous avons donc réalisé un jaugeage différentiel de la Cèze, le 2 septembre 2004, qui donne un débit d'étiage des sources de l'ordre de 300 l/s.

Figure 12
Enregistrements des événements du 8 au 12 septembre 2002 dans la zone d'Orgnac
(pluviométrie, crues des rivières en surface et engorgement des réseaux souterrains, reconstitué d'après les observations et mesures du personnel du Site et du Musée d'Orgnac).

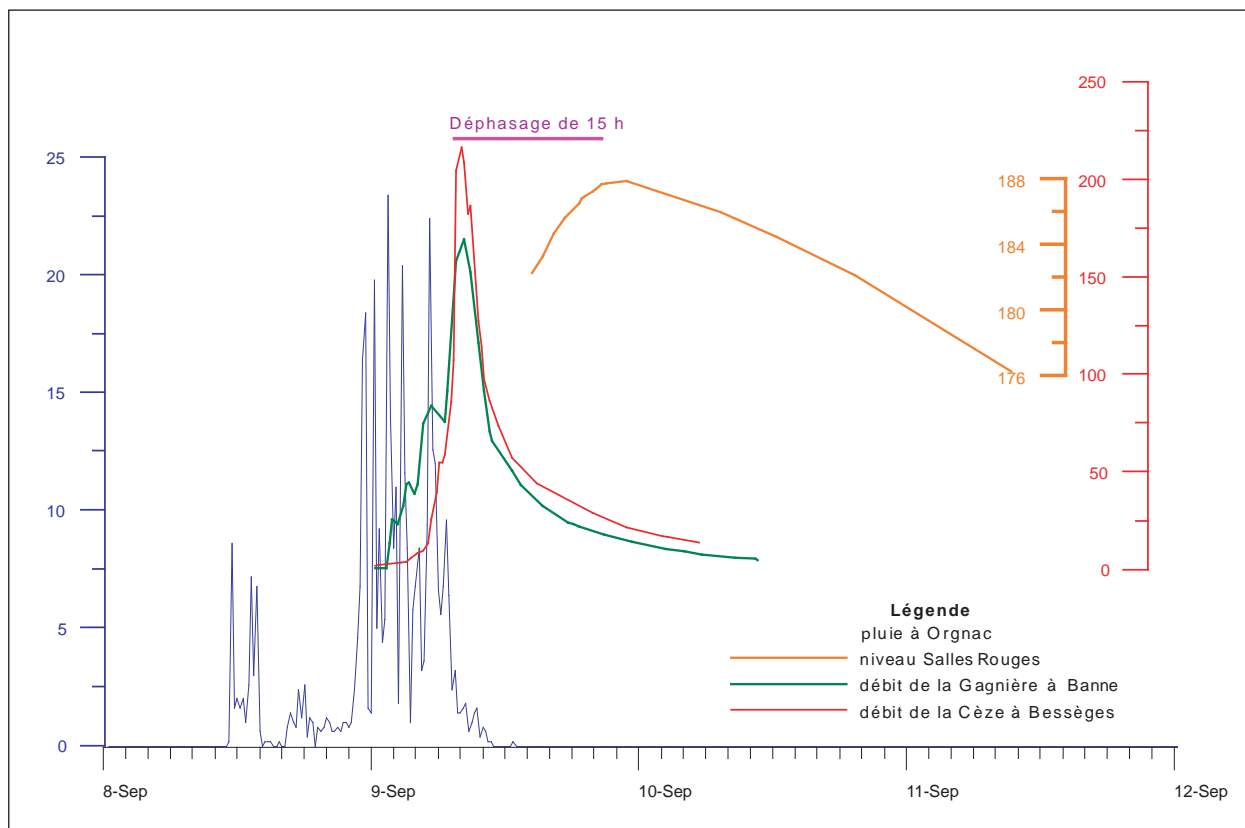




Photo1
Jaugeage de la Cèze, en amont et en aval des sources de Monteil.

L'ajustement d'une courbe de tarissement sur l'étiage de 2004 donne un coefficient $\alpha = 0,0006$ j-1 traduisant un aquifère qui se vidange lentement, ce qui implique des perméabilités faibles. Grâce au débit d'étiage mesuré des sources, il est possible de calculer un volume dynamique (volume de la zone noyée qui assure le débit d'étiage). Ce volume est égal à :

$$V = \int_0^{\infty} Q dt = \frac{Q_0}{\alpha} 86400 = \frac{0,3}{0,0006} \times 86400 = 43 \text{ millions de } m^3$$

Ce volume correspond à celui qui se vidangeait le 2 septembre 2004. En extrapolant la loi de vidange exponentielle au début de la décrue, c'est-à-dire en décembre 2003, on obtient un débit Q_0 de $0,350 \text{ m}^3/\text{s}$. Le volume serait alors de 50 millions de mètres cubes. L'importance de ce volume indique une zone noyée très étendue en amont des sources de Monteil, la zone d'Orgnac est forcément située sur cet aquifère. La zone noyée correspond à un calcaire fissuré peu karstifié, ou à un calcaire karstifié mais non fonctionnel car en partie colmaté. Le colmatage est corroboré par les remplissages importants du fond de l'aven d'Orgnac et le fort colmatage d'argile rencontré en fond de forage. La valeur régionale du module spécifique permet d'évaluer l'extension de l'aquifère entre 40 et 50 km^2 . La porosité efficace, en supposant une puissance moyenne de l'aquifère de l'ordre de 25 m, indiquée par les données du forage, est de l'ordre de 4 %.

Les informations sur les sources de Monteil et sur la piézométrie au Pavillon, montrent les caractéristiques d'un aquifère souterrain karstique qui constitue très probablement l'actif du réseau d'Orgnac-Issirac.

Les cavités des réseaux d'Orgnac sont des vestiges plus ou moins colmatés, soit par des argiles, soit par des concrétionnements, d'anciens systèmes de

drainage actifs à une époque où les niveaux de base étaient nettement plus hauts. Par rapport aux karsts actifs actuels tels que nous les connaissons, l'ensemble des cavités accessibles d'Orgnac-Issirac peut être considéré comme des systèmes annexes au drainage. On sait, en effet, pour les karsts actuels, que les vides résultant des écoulements sont organisés avec des drains (les rivières souterraines) qui assurent les voies principales d'évacuation des eaux avec des vitesses rapides dans des vides de dimensions modestes, mais en continuité. Autour de ces drains, se développent des ensembles de grandes cavités où se stockent de grandes quantités d'eau en crue, qui alimentent ensuite les drains en basses eaux et en étiage, ce sont les systèmes annexes au drainage : les vitesses d'écoulement y sont réduites. La morphologie des cavités d'Orgnac, de grande dimension, avec des ensembles séparés par des passages étroits, la présence sur paroi de cupules de plusieurs mètres de diamètre, l'existence de dépôts de décantation organisés autour de soutirages actifs, sont autant de caractères qui montrent que le réseau d'Orgnac appartient à ce type de vide.

Les cavités de l'aven d'Orgnac sont un regard sur la zone noyée et correspondraient à un système annexe au drainage, vraisemblablement peu éloigné du drain comme le montrent les faibles déphasages observés entre les crues de la Cèze et la mise en eau des Salles Rouges.

Les travaux sur les formes et les dépôts, présentés dans les deux articles précédents ont d'ailleurs montré le rôle des remplissages argileux dans l'évolution karstique des cavités (processus paragénétique). Cette évolution est compliquée ensuite par la dynamique des soutirages et les mises en charge évoquées ici.

CONCLUSION

Si le suivi environnemental du site a permis d'amasser une grande quantité d'information sur un site complexe, l'interprétation de ces données a révélé la richesse des processus actifs et les interactions entre toutes les parties du système naturel karstique. La zone noyée, dont le fonctionnement hydraulique est accessible, déterminé, lors d'événements exceptionnels à l'échelle humaine, une partie du fonctionnement et de la morphologie des réseaux souterrains. La zone d'infiltration du karst héberge les vides accessibles et constitue le lieu du transfert de matière et d'énergie déterminant les grandes constantes du milieu souterrain pénétrable. Dans certaines parties de ce réseau, un fonctionnement aérodynamique ajoute une complexité supplémentaire en terme de saisonnalité, de compartimentage géométrique et d'intensité des échanges. Enfin, en surface, la dynamique de l'infiltration et les processus pédologiques sont déterminants dans le fonctionnement des tréfonds. La caractérisation de ces phénomènes de surface et la présence de gisements archéologiques majeurs associés à différents états d'évolution des morphologies karstiques ont motivé l'extension proposée en surface du site classé de l'aven d'Orgnac.

Pour l'aven d'Orgnac comme pour tous les sites naturels fragiles, qu'ils soient souterrains ou de surface, la compréhension du fonctionnement du milieu naturel

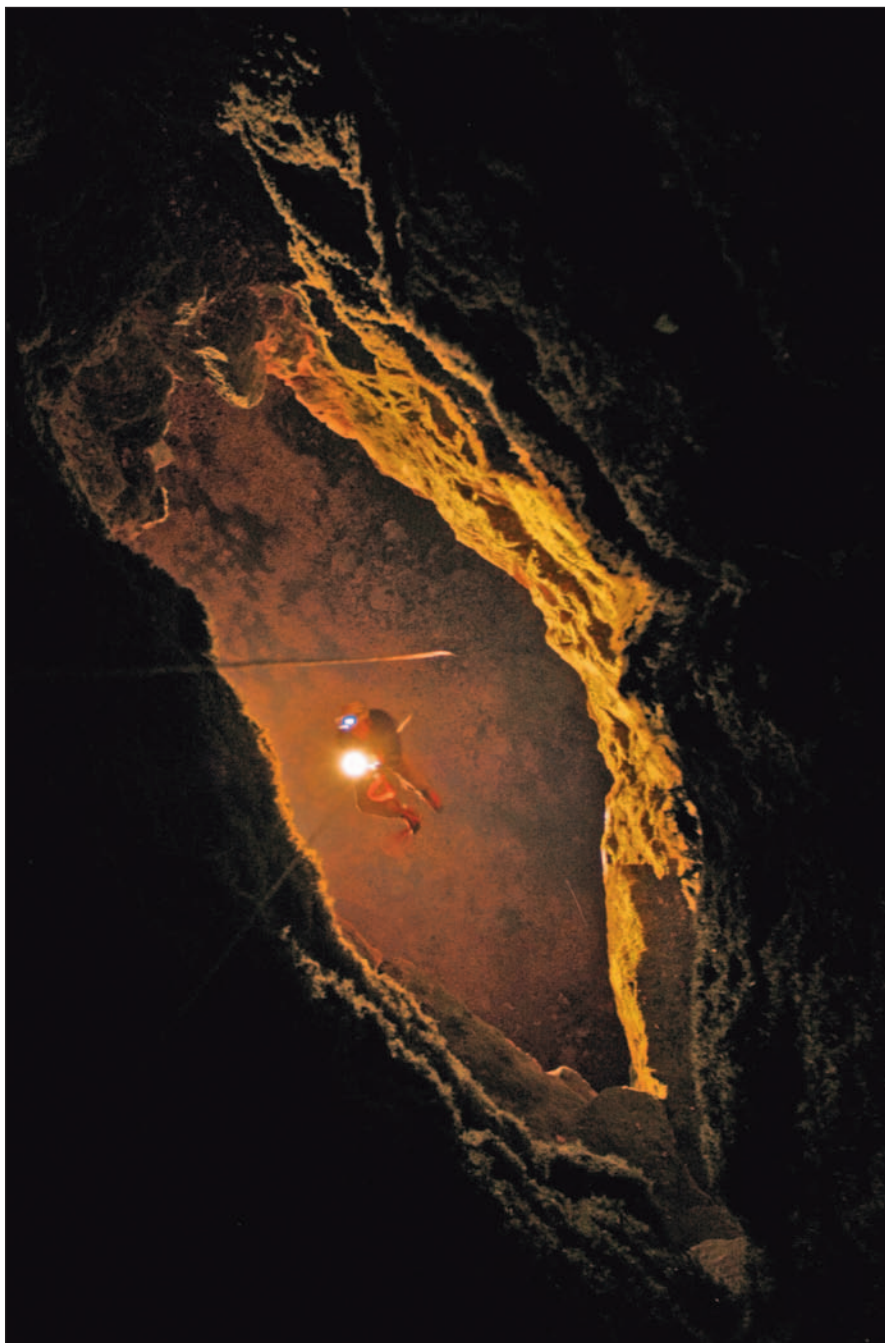
reste un préalable à la prise de bonnes décisions d'aménagement et de gestion. Les outils intellectuels et technologiques existent pour l'identification des régulations naturelles et des seuils de stabilité du milieu souterrain. Le respect de ces limites permet d'agir sans altérer de manière irréversible le système naturel et permet la mise en valeur du patrimoine naturel sans le détruire.

Des opérations d'aménagement ou d'amélioration d'un site nécessitent des investissements pour comprendre et suivre les évolutions du milieu naturel et supposent l'acceptation des conditions de gestion qui peuvent en résulter. Ces investissements ont un poids économique non négligeable mais les informations recueillies peuvent être utilisées pour faire progresser la connaissance scientifique. Localement, elles sont utilisées pour la mise en valeur, la sensibilisation du public et sont finalement un gain de qualité pour le site.

C'est plus largement le défi du développement durable qui se pose avec ses conditions d'intégrité environnementale et plus largement patrimoniale, de prospérité économique et sociale. L'aménagement de l'aven d'Orgnac apparaît comme un modèle de ce qu'il est possible de réaliser en partenariat étroit entre l'État, les élus, les scientifiques, les spéléologues et les différents partenaires locaux.

BIBLIOGRAPHIE

- BOURGES F., MANGIN A. et D'HULST D. (1998) - Le CO₂ dans l'atmosphère des grottes, sa place dans la dynamique des systèmes karstiques. *Communication à la Réunion des Sciences de la Terre de Brest*, 31 mars au 3 avril 1998.
- BOURGES F., MANGIN A. et D'HULST D. (2001) - Le gaz carbonique dans la dynamique de l'atmosphère des cavités karstiques, l'exemple de l'Aven d'Orgnac (Ardèche). *C. R. Académie des Sciences*, Paris, 333, 2001, 685-692.
- BOURGES F., MANGIN A. et D'HULST D. (2003) - Radon and CO₂ as markers of cave atmosphere dynamics: evidence and pitfalls in underground confinement; application to cave conservation. *Communication au colloque "Climate Changes : the Karst Record III"*, Montpellier (France), 11th-14th May 2003.
- BOURGES F., GENTHON P., MANGIN A. et D'HULST D. (2005) - Internal climate of some karstic caves, consequences on annual speleothem growth. *Communication to the American Geophysical Union meeting*, 5-9 dec., 2005, San Francisco (USA).
- BOURGES F., GENTHON P., MANGIN A. et D'HULST D. (2006) - Microclimates of l'Aven d'Orgnac and other French limestone caves (Chauvet, Esparros, Marsoulas). *Intern. Journal of Climatology*, 26 (12), 2006, 1651-1670.
- 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, 2003, 557-575.
- MANGIN A. (1976) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, Thèse Université de Dijon, 124 p.
- MANGIN A. (1984) - Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir d'analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of Hydrology*, 67, 1984, 27-43.
- MANGIN A. (1995) - Karst hydrogeology, in : Groundwater Ecology, J. GILBERT, D.L. DANIELOPOL, J. STANFORD and J.H. THORP, Editors. 1995, Academic Press. New York.
- PERRIER F., MORAT P., et LE MOUËL J.-L. (2001) - Pressure induced temperature variations in an underground quarry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 191, 2001, 145-156.
- WOOD W.-W. (1985) - Origin of caves and other solution openings in the unsaturated (vadose) zone of carbonate rocks: a model for CO₂ generation, *Geology*, 13, 1985, 822-824.



Le puits d'entrée de l'aven d'Orgnac : passage obligé des échanges aérodynamiques entre la cavité et l'extérieur. En régime d'été, le flux d'air souterrain provenant des grands réseaux est pour l'essentiel sortant. En régime d'hiver, le flux s'inverse, l'air extérieur plus dense entre en cascade dans la Salle de Joly (photo Stéphane Jaillet).