



© Jean-Yves BIGOT

Diagnostic de vulnérabilité



Démarche d'adaptation au changement climatique des habitats souterrains des **Cavités du Mas d'Azil, de Mérigon, de Tourtouse et d'Unjat**



Auteur

Thomas CUYPERS – ANA-Conservatoire d’Espaces Naturels Ariège

Relecture et mise en page

Christine COUDURIER – Réserves Naturelles de France,

François BOURGES – GE Conseil,

Cécile BROUSSEAU – ANA-CEN Ariège,

Jérémy CHAIGNE – ANA-CEN Ariège,

Lou DUMAINE – ANA-CEN Ariège

Remerciements

Les premiers remerciements vont à l’équipe de Réserves Naturelles de France et du LIFE Natur’Adapt pour nous avoir confié la réalisation de ce travail et nous avoir intégré à ce projet aussi enrichissant qu’urgent. J’y associe l’ensemble de la communauté Natur’Adapt qui fut d’une grande aide et qui a participé à la motivation qu’a suscité ce projet.

Je tiens à remercier l’ensemble des personnes sollicitées pour mes nombreux questionnements concernant les karsts, ses habitants et l’archéologie souterraine : Laurent Bruxelles, Didier Caihol, Marc Jarry, Frédéric Maksud, Nicole Ravaiau, Bruno Lartiges, François Bourges, Javier Fresneda, Adrià López-Baucells, Dragoş Ştefan Măntoiu. Le travail poussé de relecture par François Bourges a été d’un grand secours, merci encore ! L’équipe du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises et en particulier Gaëlle Fedrigo, Léo Poudré et Elodie Roulier ont aussi tous mes remerciements pour leur investissement et leur aide pour la réalisation de ce travail. Je tiens également à remercier Pierre-Damien Bascou, Nolwenn Pons et Clémence Poupin de la Chambre d’Agriculture de l’Ariège pour les apports quant à l’élevage et le projet Clim’Agil.

Enfin, je tiens à remercier toute l’équipe de l’ANA-CEN Ariège pour l’intérêt porté à la démarche et pour leurs avis, relectures apportées tout au long du projet. Nous sommes maintenant une petite équipe à travailler sur le sujet !

Citation de l’ouvrage

CUYPERS T., 2022. Diagnostic de vulnérabilité au changement climatique des cavités du Mas d’Azil, de Mérigon, de Tourtouse et d’Unjat. LIFE Natur’Adapt – Rapport ANA-CEN Ariège. 47 p.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	5
INTRODUCTION	6
ENJEUX DE CONSERVATION	7
Gîtes majeurs de populations de chiroptères.....	7
Vers une Réserve Naturelle Nationale	7
Habitat d'une faune invertébrée riche et endémique	8
Des archives sur l'histoire de l'Homme et des paléo-environnements	9
Des cavités représentatives de la diversité locale des enjeux, menaces et protections	10
LE KARST, UN MILIEU DYNAMIQUE.....	15
LES FACTEURS D'INFLUENCE	18
Les microclimats au sein des cavités.....	19
Le rôle des habitats de surface.....	19
Les activités humaines souterraines	20
LE CLIMAT PASSÉ, PRÉSENT, FUTUR.....	21
Caractérisation du climat local – deux échelles d'analyse.....	21
Les habitats de surface, dits « épigés ».....	21
Le karst	21
Méthodologie.....	22
Le climat actuel du Plantaurel, des Petites Pyrénées et des Avants-Monts.....	23
La température atmosphérique	23
La pluviométrie.....	24
Les évolutions du climat du Plantaurel, des Petites Pyrénées et des Avants-Monts.....	25
La température atmosphérique	25
La pluviométrie.....	27
Les événements climatiques extrêmes	27
QUELLE ÉVOLUTION FUTURE DES ACTIVITÉS HUMAINES ?	28
Agriculture et Sylviculture.....	28
Spéléologie et Tourisme.....	29
QUELLE ÉVOLUTION FUTURE DES OUTILS ET MOYENS DE GESTION ?	30
Caractérisation des outils et moyens de gestion	30
La gouvernance	30
Les financements.....	31

Perspectives d'évolution des outils et moyens de gestion	31
Evolution des financements actuels.....	31
Projet de Réserve Naturelle Nationale.....	32
QUELLE EVOLUTION FUTURE DU PATRIMOINE NATUREL ?.....	34
La forêt	34
Les milieux agro-pastoraux	34
La population de Rhinolophes euryale.....	35
Les invertébrés cavernicoles	37
Le patrimoine archéologique et géologique	37
RECIT PROSPECTIF DES GROTTES DU PLANTAUREL ET DES AVANTS-MONTS ARIEGEOIS SOUS L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	39
CONCLUSION	41
LISTE DES ACRONYMES	42
BIBLIOGRAPHIE.....	43

RÉSUMÉ

Le massif des Pyrénées est un massif montagneux récent ayant débuté sa formation au Cénozoïque et abritant une biodiversité exceptionnelle. Cela s'explique par la confrontation de nombreux climats différents induisant une grande variété d'habitats dans un contexte agricole et sylvicole plutôt extensif et où les pressions humaines semblent relativement faibles. Et cette biodiversité exceptionnelle se retrouve aussi bien en surface que dans les milieux souterrains.

La variété des environnements karstiques qu'abrite le département de l'Ariège illustre la grande diversité des géotopes en présence. Ils offrent une vaste quantité de contextes cavernicoles différents dont d'importants volumes favorables aux populeuses colonies de chauves-souris qui y trouvent leur gîte et un contexte épigé favorable à leurs proies, les invertébrés. Les chauves-souris apportent une quantité non négligeable de matière organique sous terre via le guano. Elles favorisent ainsi une faune invertébrée riche et au taux d'endémisme incroyablement important du fait de l'histoire des Pyrénées. Ces invertébrés, souvent présents dans le sol, sont ainsi maintenus par une abondance de nourriture fournie par ces mammifères.

Les êtres humains fréquentent aussi les cavités à des fins culturelles liées à l'histoire par les vestiges archéologiques mais aussi pour la pratique sportive et l'étude des milieux souterrains dans son ensemble via la spéléologie. La conservation des vestiges peut, dans certains cas, être diminuée par une corrosion induite par leur respiration et leurs déjections. A l'inverse, la fréquentation des cavités souterraines, qu'elle soit à des fins scientifiques, sportives ou touristiques peut être négative pour la quiétude, la reproduction ou l'hibernation des chauves-souris. Le travail des gestionnaires est d'adapter ces pratiques afin qu'elles restent compatibles avec l'ensemble des patrimoines des cavités.

Simultanément, le milieu karstique et tout ce qu'il abrite, à savoir le patrimoine et les activités humaines, sont exposés au changement climatique. Les grottes, aussi peu étudiées soient elles, révèlent mieux qu'ailleurs l'avancée galopante du changement climatique. On y observe, du fait des faibles variations des conditions climatiques au sein de la grotte, la dérive climatique de façon beaucoup plus nette qu'en extérieur ainsi que l'influence du changement climatique sur la température et d'autres facteurs conjecturels tels que l'humidité ou les concentrations en CO₂.

L'évolution de ces paramètres climatiques ne sera pas sans incidence sur le patrimoine que renferment les cavernes. Sans pour autant connaître avec précision la trajectoire de ces paramètres sur les sites étudiés, nous pouvons poser quelques hypothèses sur la base de travaux effectués sur ces sites ou ailleurs. Les espèces cavernicoles choisissent les grottes pour les conditions qu'elles offrent en termes de tranquillité ou de microclimat, ce qui évolue déjà rapidement. On peut donc s'attendre à une évolution de l'occupation des grottes, positive ou négative, par ces espèces. Ces conditions microclimatiques sont aussi capitales pour la conservation du patrimoine archéologique et pariétal en particulier. L'assèchement ou une hausse des températures peut modifier les processus en place qui ont protégé ces vestiges depuis des millénaires.

L'étude et la conservation du karst est aussi fortement liée à la capacité que nous avons, humains, à y progresser. Il est possible que les conditions d'accès évoluent pour les besoins de la conservation dans les sites touristiques si les taux de CO₂ viennent à dépasser des concentrations incompatibles avec leurs objectifs de conservation.

La principale conclusion de ce diagnostic est qu'il met en lumière la vulnérabilité des milieux souterrains d'Ariège mais aussi l'opportunité qui s'offre à nous de mieux les connaître dans un contexte de changement climatique. Le niveau de méconnaissance face aux enjeux de conservation est tel que les milieux souterrains méritent désormais une part d'attention et des études à la hauteur des bouleversements actuels.

INTRODUCTION

Les cavités du Mas d'Azil, de Mérigon, de Tourtouse et d'Unjat forment un réseau de sites souterrains composé de 4 cavités qui ont en commun leur proximité au sein de trois massifs karstiques proches, à savoir le Plantaurel et son prolongement occidental des Petites Pyrénées (terrains tertiaires plissés) et les Avants-Monts de la zone Nord Pyrénéenne (terrains secondaires écaillés). Elles figurent parmi les sites prioritaires à intégrer au sein d'un projet de Réserve Naturelle Nationale Souterraine d'Ariège (RNNSA ci-après). Elles jouent par ailleurs un rôle majeur pour la conservation de populations de chiroptères cavernicoles : Minioptère de Schreibers, Grand et Petit murin, Rhinolophe euryale. Ces 4 grottes couvrent des contextes variés, qui balayent la majeure partie des enjeux et facteurs d'influence que l'on peut rencontrer sur les milieux souterrains : fréquentation touristique, pratique de la spéléologie, trafic automobile, rivière souterraine, concrétions géologiques remarquables, vestiges archéologiques et surtout des enjeux biologiques exceptionnels pour les chiroptères et les invertébrés cavernicoles. Les statuts de protection sont variés - Natura 2000, site acquis et/ou gérés par l'ANA-Conservatoire d'Espaces Naturels Ariège, arrêté préfectoral de protection de biotope ou arrêté municipal.

La spéléologie et la promenade souterraine sont des activités communes aux 4 cavités, parfois liées à des projets de recherche (écologie, archéologie). Tourtouse et Mérigon sont faciles d'accès avec des enjeux de temporalisation de leur fréquentation hors période sensible pour les espèces. Les grottes du Mas d'Azil et d'Unjat ne permettent qu'une fréquentation encadrée. Les usages de loisirs à l'entrée des cavités (regroupements, feux) sont réguliers sur les sites accessibles.

La grotte du Mas d'Azil est un haut-lieu touristique de l'Ariège (40 000 visiteurs/an, géré par le SESTA, Service d'exploitation des sites touristiques Ariège). Le site est aménagé pour l'accueil du public et d'expositions (avec parfois des conséquences sur le microclimat des cavités), et impose un travail permanent de conciliation des usages. Les autres cavités ne sont pas exploitées de la sorte. La grotte est traversée par une route départementale très fréquentée. Le dérangement et la pollution induits par la circulation automobile sont à même de menacer directement les équilibres biologiques et climatiques de la cavité. Des mortalités inexplicables de Minioptères de Schreibers ont été constatées, avec l'hypothèse d'une intoxication non vérifiée à ce jour. Des suivis et travaux sur ces hypothèses ont récemment été initiés.

La recherche scientifique (biologie, archéologie, géologie) et la prospection sont des activités qui ont toute leur importance sur l'ensemble des cavités ariégeoises. Certaines de ces activités relèvent d'obligations conservatoires tels que certains suivis sur des éléments identifiés en opposition à d'autres qui restent optionnelles tel que le tourisme ou la pratique sportive, par exemple. La grotte du Mas d'Azil présente des vestiges archéologiques et paléontologiques, donnant lieu à des campagnes de fouille et parfois des aménagements (condamnation de galeries, etc). Elle est classée au titre des monuments historiques et au titre des sites et paysages « Cours souterrain de l'Arize ». La Mine d'Unjat présente des concrétions exceptionnelles ayant fait l'objet de travaux de recherche.

Ces sites sont un panel représentatif d'un bon nombre de cavités pyrénéennes, tant par le patrimoine naturel qu'elles accueillent (biologique, géologique, archéologique, historique) que par leur attrait pour l'Homme avec les opportunités et les menaces associées. Ces 4 cavités ne sont pas les seules gérées sur le département, elles font partie d'un réseau qui sera prochainement fédérées au sein d'une RNN. Les nombreux bénéfices acquis à l'issue du LIFE seront donc profitables à un échantillon plus large, au travers de différents types d'approches de gestion. La diversité des propriétaires (communes, privés, association) ainsi que des gestionnaires apporte un atout supplémentaire à cet exercice, faisant foi d'un désir de co-construction dans la gestion de ces sites.

ENJEUX DE CONSERVATION

Gîtes majeurs de populations de chiroptères

La formation des Pyrénées a engendré, comme cela a été décrit en introduction, une extraordinaire diversité de milieux. Parmi ceux-ci, les calcaires plus anciens, charriés, transformés par l'orogénèse, ont entraîné la formation de karsts et donc de nombreuses cavités. Ce territoire collinéen et montagnard a favorisé le maintien d'une agriculture de petite taille, la conservation du bocage et, en conséquence, la persistance d'une mosaïque d'habitats où une grande diversité d'espèces de chiroptères y trouve « gîte et couvert ». Les populations de chauves-souris cavernicoles qui fréquentent le département représentent encore, comparativement à d'autres localités plus durement touchées par les modifications paysagères de l'après-guerre, de véritables bastions pour les espèces en question, et cela malgré la diminution généralisée des populations de chiroptères durant les 60 dernières années, qui n'épargne pas celles d'Ariège.

Ce sont donc 30 espèces qui sont citées dans le département donc 5 présentant des enjeux au niveau des sites cavernicoles, en particulier les 4 cavités concernées par ce diagnostic de vulnérabilité et d'opportunité : le Grand rhinolophe, le Rhinolophe euryale, le Minioptère de Schreibers, le Grand murin et le Petit murin. Ces cavités relèvent, pour ces espèces, des enjeux internationaux (Unjat), nationaux (le Mas d'Azil, Tourtouse) et régionaux (Mérigon). Ces cavités participent aux populations locales estimées à près de 15 à 20% des effectifs nationaux (Boleat et al., 2019).

Parmi les nombreuses menaces pesant sur les chiroptères, le climat est d'ores et déjà identifié comme un facteur d'influence potentiel sur les gîtes et les habitats de chasse en Ariège (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement d'Occitanie et al., 2022). En effet, ces espèces sont intimement liées aux conditions microclimatiques des cavités (Ecosphère et al., 2020) ainsi qu'aux habitats environnants (Goiti et al., 2004, 2008; Ransome, 1968; Tuneu-Corral et al., 2020)



Vers une Réserve Naturelle Nationale

Ces 4 cavités font partie d'un vaste projet de Réserve Naturelle Nationale réunissant 28 sites souterrains de l'Ariège. Cette vitrine du milieu souterrain pyrénéen abrite des enjeux exceptionnels pour les chiroptères, une représentation importante de la diversité des invertébrés cavernicoles des Pyrénées, des enjeux géologiques et archéologiques reconnus à un niveau international. Au début de l'année 2022, ce projet a reçu un avis favorable à l'unanimité de la part du CNPN. La dérive climatique menaçant l'ensemble de ces enjeux de conservation devra être au centre des préoccupations de cette Réserve.

Habitat d'une faune invertébrée riche et endémique

La région des Pyrénées centrales est un véritable hotspot de la biodiversité des invertébrés cavernicoles (Culver et al., 2021; Faille & Deharveng, 2021). Plusieurs dizaines d'espèces troglobies et stygobies sont, par exemple, strictement endémiques du département de l'Ariège et, souvent, d'un unique massif karstique. Les groupes les plus emblématiques sont les Coléoptères (Fig. 1), les Arachnides, les Crustacés (Isopodes, Amphipodes, Copépodes), les Myriapodes (Chilopodes, Diplopodes), les Gastéropodes ou encore les Collemboles. Ils bénéficient d'un riche historique de recherche légué par la forte activité du Laboratoire Souterrain de Moulis et de ses chercheurs au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle avant sa transition vers la Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale en 2007.

Ces espèces qui possèdent de nombreuses adaptations à la vie souterraine sont souvent contraintes dans le potentiel de dispersion par la géomorphologie et l'hydrogéologie ou même leur physiologie. L'aire d'étude considérée comprend trois massifs karstiques voisins mais disjoints, à savoir le Plantaurel, les Petites Pyrénées et les Avants-Monts. Cette unité abrite des espèces endémiques de ces massifs karstiques. Leur patrimonialité est donc exceptionnelle et les facteurs influant sur leur état de conservation sont encore très méconnus.

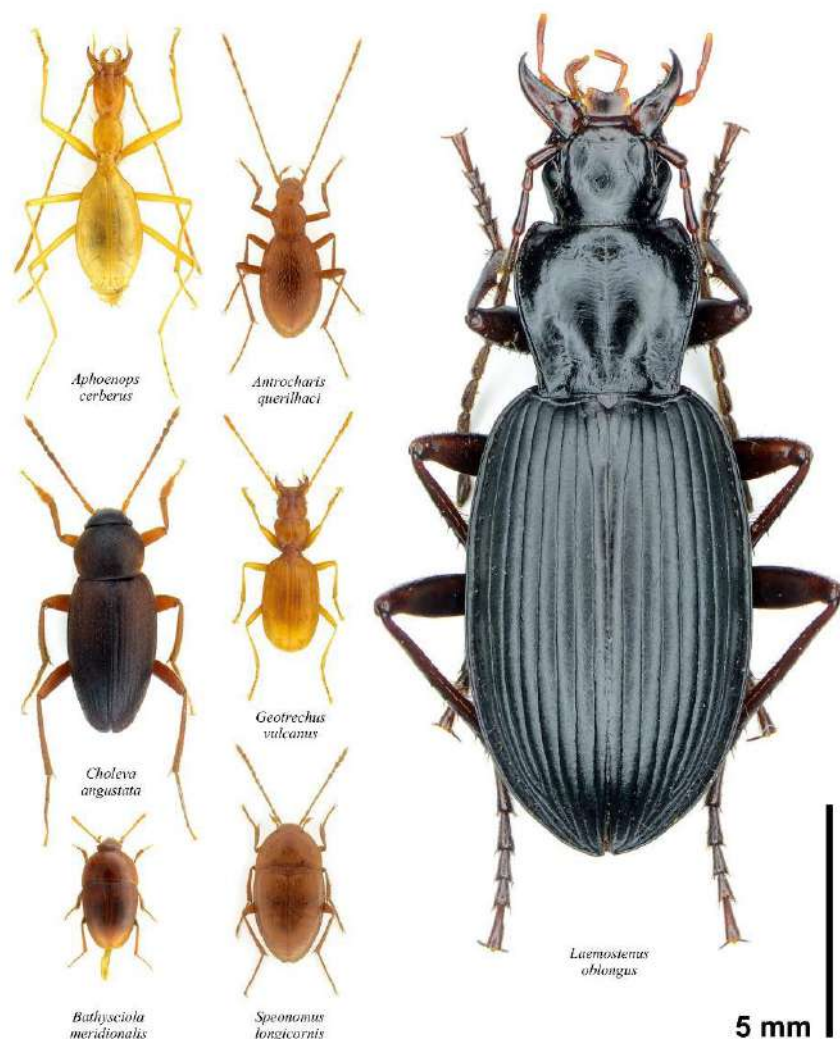


Figure 1 : Quelques coléoptères troglobies et troglophiles du Plantaurel (Grotte du Portel Est, Loubens 09 - clichés Pierre Zagatti).

Des archives sur l'histoire de l'Homme et des paléo-environnements

Le territoire ariégeois possède un patrimoine archéologique exceptionnel en milieu souterrain, tant par la richesse des vestiges que par leur caractère souvent remarquable et par leur étendue chronologique. La période paléolithique, en particulier, est représentée dans plusieurs sites majeurs de renommée internationale, que ce soit pour les vestiges d'habitats, sous porches ou en grottes, mais aussi et de manière parfois magistrale, pour les vestiges laissés sur les parois par les artistes préhistoriques. Le patrimoine médiéval, bien que moins « original », est également très riche avec des habitats médiévaux troglodytiques et de nombreuses fortifications de cavités (spoulgas). Les autres périodes ne sont pas exclues, comme le Néolithique ou la Protohistoire par exemple, tout cela de manière souvent complémentaire avec une richesse archéologique générale importante, témoignant du peuplement ancien et continu de ce milieu montagnard (orris, ouvrages en pierres sèches, mégalithes...). Enfin, des recherches en cours montrent également l'importance du patrimoine archéologique plus récent, que nous pouvons qualifier de pré ou proto-industriel, que sont les mines, les extractions de guano ou les exploitations de salpêtre.

L'ensemble de ces enjeux est remarquablement représenté au Mas d'Azil qui abrite un patrimoine archéologique considérable. Il s'agit du site éponyme de l'Azilien, accueillant aussi un gisement majeur - si ce n'est le plus important des Pyrénées - du Magdalénien ainsi que des niveaux Aurignaciens. Ces différentes époques nous ont livré de nombreux objets mobiliers exceptionnels, des sépultures et un art pariétal riche à l'image de la Galerie Breuil par exemple. De nombreux restes faunistiques allant des espèces les plus emblématiques du Quaternaire (Ours des cavernes, Mammouth) jusqu'à une faune du secondaire comme l'illustre, par exemple, la récente découverte d'une nouvelle espèce de mammifère euthérien du genre *Azilestes* dans les niveaux du Crétacé supérieur renseigne sur l'environnement dans lequel ont vécu les Hommes préhistoriques.

Des études en cours sur les liens entre paléoenvironnements, climat et l'Homme permettent d'expliquer la formation des cavités telles que nous les connaissons de nos jours. Elles mettent en exergue la nécessaire interdisciplinarité dans la recherche pour la conservation de ce patrimoine. La compréhension sur l'état de conservation des milieux souterrains par cette approche intégrative du karst a donc permis d'identifier le rôle direct et indirect du climat sur ces milieux par le passé et permet d'initier une vision prospective de l'avenir à laquelle le LIFE Natur'Adapt contribue de façon certaine.

Des cavités représentatives de la diversité locale des enjeux, menaces et protections

Comme évoqué précédemment, la protection des karsts pyrénéens est un enjeu majeur de conservation. Les contextes sont aussi différents, d'un site à l'autre, qu'il y a de localités. Sans compter que la large palette de climats allant de la Méditerranée à l'Atlantique, du Sud en Espagne au Nord en France vient complexifier l'analyse des enjeux de conservation dans un contexte de changement climatique. Nous avons donc mené ce diagnostic de vulnérabilité et d'opportunité sur un échantillon cohérent - dans un contexte géographique restreint - pour la faune et le climat. Nous avons ensuite, au sein de cette zone géographique, retenu quatre cavités présentant des statuts très différents au titre de leur protection réglementaire et des facteurs d'influence des enjeux précédemment identifiés.

Tableau 1 : Aires protégées, enjeux et menaces identifiées pour chaque grotte retenue pour l'étude.

		Mas d'Azil	Unjat	Tourtoise	Mérigon
Aires protégées	Parc Naturel Régional	x	x	x	x
	Natura 2000	x		x	
	APPB			x	
	Arrêté municipal		x		
	Site acquis par le CEN			En cours	x
	Projet RNN	x	x	x	x
	Sites et paysages	x			
	Monuments historiques	x			
Patrimoine naturel	Développement (m)	2100	5474	800	18
	Hydrologie	+++	++	++	-
	Spéléologie	*	+++	++	-
	Archéologie	+++	+	+	-
	Géologie	+++	+++	++	-
	Chiroptères	National	International	National	Régional
	Invertébrés	4	2	8	0
Menaces identifiées	Changement climatique				
	Tourisme	x			
	Exploration		x	x	
	Traffic auto	x			
	Nuisances volontaires				x

Grotte du Mas d'Azil

Située sur la commune éponyme, la Grotte du Mas d'Azil est un véritable emblème de l'étude des milieux souterrains et de l'histoire humaine pour l'Ariège. Elle abrite encore des enjeux très importants pour la conservation des chiroptères qui viennent s'y reproduire mais est aussi un lieu où les menaces anthropiques pour les chauves-souris et le karst se confrontent particulièrement.

Le passé de la grotte, exploitée pour le salpêtre et les phosphates, a largement bouleversé les couches de dépôts sédimentaires du site. L'aménagement d'une route qui traverse le site apporte de son côté une pollution de l'air. L'exploitation touristique, elle, a engendré l'installation d'infrastructures (éclairage, cheminements bétonnés ou métalliques), d'exposition artistiques (sons et lumières) et pourrait participer aux apports d'air chaud ainsi que de CO₂ et d'eau dus à la respiration et à la chaleur corporelle des visiteurs.

A des fins de conservation du patrimoine archéologique dans l'objectif de restituer un état de confinement antérieur qui était celui de la conservation optimale des vestiges, des aménagements (cloisons) ont été construits, réduisant l'accessibilité à certaines parties du réseau pour les chauves-souris. Le passage de l'Arize, une rivière, au sein de la grotte participe aussi à la complexité des interactions en place et donc à la compréhension du fonctionnement microclimatique de la cavité. La grotte du Mas d'Azil est classée Monument Historique depuis 1942 (6 août et 26 octobre pour les gisements préhistoriques) et au titre des sites et paysages pour le cours souterrain de l'Arize (arrêté ministériel du 2 décembre 1943).

En surface, le site présente principalement des prairies et pelouses calcicoles, pâturées en été, entrecoupées de forêts de feuillus. Du chêne pédonculé est présent. La grotte du Mas d'Azil correspond à la percée hydrogéologique de la rivière Arize : au niveau du synclinal du site Natura 2000, elle s'est infiltrée, formant un tunnel naturel de 420 mètres de long et 50 mètres de haut par endroits. Les alentours de la grotte sont très fréquentés en période estivale : les berges de l'Arize sont aménagées pour recevoir du public, en bord de route. La grotte est aussi traversée par un GR. La grotte du Mas d'Azil se situe dans le périmètre Natura 2000 « Queirs du Mas d'Azil et de Camarade, grottes du Mas d'Azil et de la carrière de Sabarat ». Le document d'objectifs est le document de gestion sur l'ensemble du périmètre. Il est mis en œuvre par le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNRPA). La grotte est gérée par le SESTA et fait l'objet d'un parcours touristique. Outre l'exploitation touristique de la grotte, des animations sont organisées par la commune du Mas d'Azil et par le PNR. Des mesures agro-environnementales et climatiques sont aussi mises en œuvre sur le périmètre, concernant notamment le maintien des pratiques pastorales extensives sur les prairies et zones de pelouses, en périphérie de la grotte. Le site accueille une avifaune rupestre riche, dont plusieurs espèces rares et menacées, certaines protégées (Grand-duc, Grand-corbeau, Martinet à ventre blanc) mais aussi une flore originale liée au calcaire.



Figure 2 : Entrée aval de la Grotte du Mas d'Azil et vue du paysage du Plantaurel

Grotte de Mérigon

La Grotte de Mérigon est une petite cavité acquise par l'ANA-CEN09 pour la présence d'une importante colonie de Rhinolophes euryale présente en reproduction et en transit automnal. Le site est protégé depuis la fin de l'année 2021 à l'aide d'un périmètre grillagé et dispose d'un plan de gestion en cours. Les actions principales du plan de gestion consistent à renforcer sa protection, pérenniser le suivi de la colonie, tester de nouvelles méthodes de suivi, sensibiliser et inclure le site dans des projets de recherche.

Située au bord d'une route départementale, elle est vulnérable aux dérangements pour les chauves-souris. Plusieurs obstructions volontaires ont été notées au cours des dernières années ce qui a motivé sa fermeture en 2021. Cela dit, la grotte ne présente aucun intérêt spéléologique du fait de sa progression difficile et son développement ridiculement faible (environ 18 mètres). L'intérêt archéologique y est très faible bien que peu étudié.

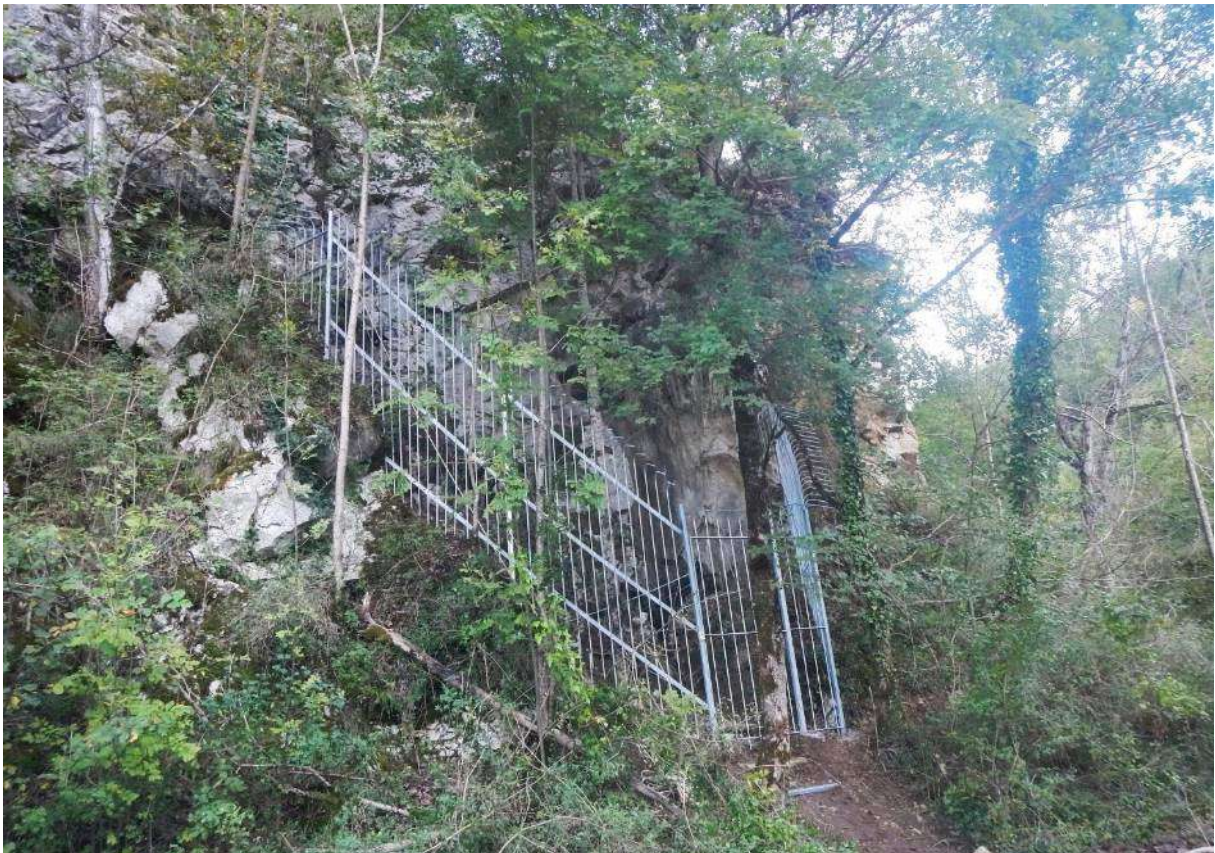


Figure 3 : Entrée de la Grotte de Mérigon

Grotte de Tourtouse

Située à quelques dizaines de mètres du cœur du village, la grotte de Tourtouse s'ouvre au milieu d'une prairie. La majeure partie de la grotte de Tourtouse se développe ensuite sous une colline calcaire recouverte d'une forêt. L'autre partie des galeries courent parallèlement à la route sous les prairies d'élevage. La grotte de Tourtouse a un développement de 800 m et une profondeur de 10 m. Elle s'ouvre par une galerie horizontale aboutissant à un puit de quelques mètres. Un ruisseau souterrain rémerge dans le village quelques centaines de mètres plus bas.

Un suivi des chiroptères est réalisé. Le site abrite la plus grande colonie de reproduction d'Ariège concernant le Minioptère de Schreibers, le Rhinolophe euryale, le Grand murin et le Petit murin pour un total d'environ 5000 à 6500 adultes. Elle bénéficie d'ailleurs d'un arrêté préfectoral de protection de biotope interdisant la pénétration dans la cavité pendant la période de reproduction

La grotte représente peu d'enjeu pour la spéléologie. Il semblerait que tout ait été exploré dans les années 70. La grotte n'est pratiquement plus utilisée pour l'initiation et n'a plus d'intérêt en termes de recherche. Seule l'exploration de la galerie « active » (où se trouve le cours d'eau souterrain) présente un enjeu d'exploration mais rendue presque impossible par l'arrêté protégeant les chauves-souris en y interdisant l'accès en période d'été. Quelques rassemblements festifs ont lieu et quelques visiteurs peuvent venir chercher les *Aphaenops*, des petits carabiques cavernicoles protégés.

D'un point de vue archéologique, la grotte présente des enjeux potentiellement forts. Des pièces de monnaie romaine avaient été trouvées au niveau du porche au début du XXème siècle mais il n'y a plus de fouille à ce jour.

Ce site fait l'objet d'une animation foncière de la part de l'ANA-CEN09 en vue d'une acquisition.



Figure 4 : Rhinolophe euryale en hibernation à la Grotte de Tourtouse

Grotte de la Mine du Pouech d'Unjat

La mine du Pouech d'Unjat est située sur le versant nord du Pouech d'Unjat qui culmine à près de 700m d'altitude. Le paysage y est marqué par les formations karstiques : dolines, lapiaz et champ de pierres, parfois recouverts de zones boisées. La végétation du Pouech d'Unjat est rase, et toute la colline est utilisée pour des pâturages. A proximité du Pouech, vers le nord se trouve un éco-golf, augmentant ainsi potentiellement les visites du site. Un sentier balisé fait le tour du Pouech et passe à proximité des entrées de la mine. Tout ce secteur est entaillé par les profondes tranchées d'exploitation de la bauxite, qui forment de grandes saignées rougeâtres le long des collines, du Pouech à Cadarcet. Le secteur du Pouech d'Unjat n'est drainé que par un seul cours d'eau actif, le ruisseau de l'Aujole qui longe le flanc sud du massif, et rejoint l'Arize à La Bastide-de-Sérou.

La Mine d'Unjat est un réseau karstique mis à jour par l'exploitation de la bauxite. Une galerie de mine a, en effet, ouvert une entrée sur un réseau alors inexploré. Ce n'est donc que par la suite que la colonisation par les chauves-souris a pu se faire pour l'époque contemporaine. De nos jours, ce site est un des trois sites les plus importants pour l'hibernation du Rhinolophe euryale en France. Il abrite aussi la reproduction d'une colonie de la même espèce. Pour les invertébrés, le site est étonnamment peu riche par rapport à d'autres sites du piémont pyrénéen où le développement est important. Le potentiel de découverte y est donc important car finalement peu prospectée. Le patrimoine géologique de la grotte est aussi original, en particulier d'un point de vue minéralogique, sédimentologique, stratigraphique, paléontologique et tectonique.

La Mine d'Unjat est une cavité facilement accessible, bien connue d'un grand nombre de personnes qui y viennent pour différentes activités. D'une part les « locaux », qui par curiosité viennent faire un tour dans cette mine inexploitée depuis seulement une quarantaine d'années, où l'on peut observer encore le



Figure 5 : Galerie d'entrée de la Grotte du Pouech du Mine d'Unjat et une colonie d'hibernation de Grands rhinolophes particulièrement vulnérables aux dérangements

matériel en place. D'autre part, des minéralogistes qui trouvent dans cette ancienne mine de bauxite des cristaux de quartz d'une qualité remarquable (comm.pers. Nicole Ravaiau). Enfin des spéléologues pour son superbe développement de près de 6 kilomètres qui offre encore des possibilités d'exploration. Par ailleurs il est important de noter qu'il existe une seconde entrée qui a été creusée afin de faciliter l'accès directement à la partie inférieure de la cavité en période d'étiage de la rivière souterraine. Cette entrée non naturelle a été busée et cadencée, et fait l'objet d'une ouverture auprès des spéléologues sur demande.

Un suivi par éco-compteur a été mené sur l'accès principal et a révélé une fréquentation importante du site ce qui a motivé la mise en place d'un arrêté municipal restreignant l'accès aux spéléologues fédérés ainsi qu'aux suivis scientifiques. En 2019, un accident impliquant de nombreux secouristes a permis d'évacuer un adolescent qui s'est blessé dans la cavité à la suite d'une chute. La préfecture a donc demandé le renforcement de sa protection. Le comité départemental de spéléologie de l'Ariège a donc sécurisé les puits d'entrée et installé un cadenas à code au niveau de la porte d'entrée qui était restée ouverte de longues années. Depuis un registre permet de suivre la fréquentation du site.

LE KARST, UN MILIEU DYNAMIQUE

Une grotte n'est autre qu'une fenêtre sur le karst. C'est réellement ce dernier qui importe lorsqu'on évoque la conservation des milieux souterrains. Le concept de « grotte » ou « cavité » représente la partie accessible par l'Homme dans le karst. Mais cette notion d'accessibilité est toute relative du point de vue des invertébrés, de la faune microbienne, de l'eau, des gaz... La compréhension du fonctionnement du karst est donc un préalable essentiel à l'évaluation de son état de conservation ainsi que des effets potentiels du changement climatique sur cet habitat.

Les formations calcaires de différents âges sont impliquées dans l'orogénèse pyrénéenne. Ces secteurs calcaires sont soumis à une dissolution par l'eau de pluie qui a façonné en surface des paysages caractéristiques et organisé en souterrain des réseaux d'infiltration et de drainage. Cette organisation morphologique et hydrogéologique en unité de drainage est un système karstique. Les systèmes karstiques sont des aquifères, c'est-à-dire des milieux poreux permettant le stockage d'eaux souterraines.

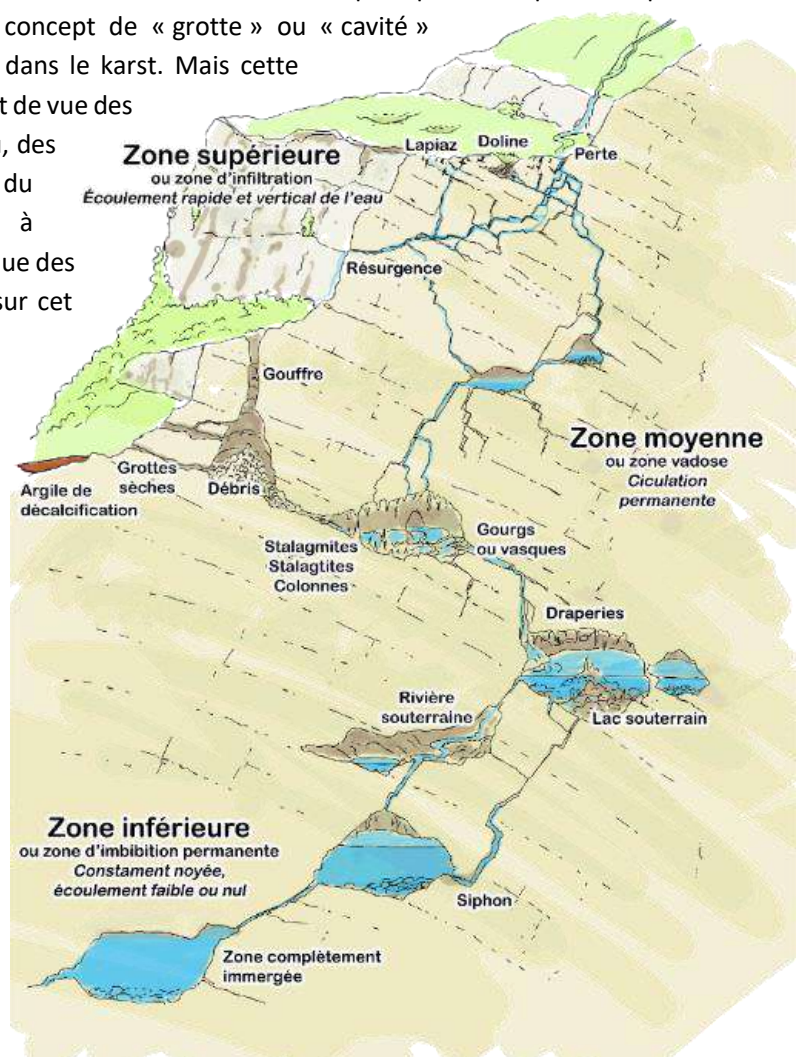


Figure 6 : Coupe schématique d'un massif karstique et les différentes configurations possibles. Illustration Julien Vergne

La dissolution des calcaires façonnant le karst s'opère par la rencontre des eaux d'infiltration et du dioxyde de carbone présent dans l'air, du sol et de la roche, dissolvent le carbonate de calcium et le carbonate de magnésium (Fig. 6). Ce processus de dissolution est dépendant de nombreux facteurs : concentration en dioxyde de carbone, saturation en eau, température, pression atmosphérique, largeur des conduits, vitesse d'écoulement de l'eau... Il se traduit par un élargissement des réseaux souterrain et le concrétionnement (formation de spéléothèmes) : c'est la **karstification**.

La production de bicarbonate de calcium participe à la formation de calcite en se déposant sur les parois et les concrétions. Ce processus a un effet direct sur la topographie de la grotte mais est aussi un facteur déterminant pour la conservation de l'art pariétal. En effet, la vitesse de formation de la calcite peut avoir une incidence sur son opacité et donc porter atteinte à ces vestiges ou au contraire les protéger lorsque la calcite est transparente.

L'absence d'eau va entraîner la « fossilisation » des réseaux via un assèchement des galeries. Cela se produit par exemple lorsqu'un cours d'eau incise un massif karstique qui va voir les réseaux les plus anciennement ennoyés se fossiliser à mesure que l'eau descend dans le massif.

Le karst est donc typiquement un système sensible aux variations météorologiques et climatiques, en particulier aux évolutions de la pluviométrie et aux états de surface résultants : épaisseur des sols et végétation qui vont influencer sur l'infiltration des eaux de pluie dans l'épikarst (zone supérieure).

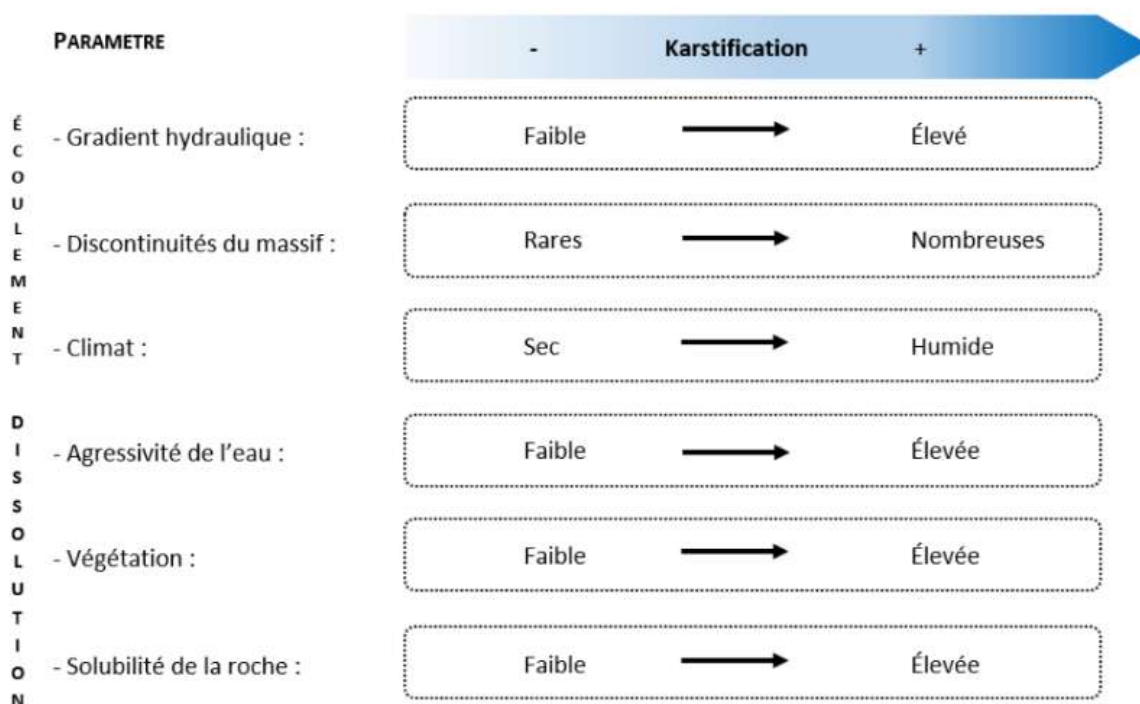


Figure 7 : Paramètres influençant la karstification. Extrait Paran *et al.*, 2022.

De récents travaux de recherche mettent aussi en évidence le rôle de la bio-corrosion liée à la faune et en particulier aux chiroptères. La respiration, produisant eau et dioxyde de carbone, ou l'accumulation de guano vont, par le même procédé, corroder le calcaire et influencer sur la spéléogénèse tardive des cavités. Plus concrètement, cela peut se traduire par le recul des parois, l'altération des spéléothèmes (concrétions minérales issues de la karstification) et des remplissages ou encore modifier la climatologie du réseau souterrain. La présence de chiroptères permet aussi un apport en matière organique considérable qui va

jouer un rôle important dans le réseau trophique et, notamment, favoriser la faune dite « du guano » allant des décomposeurs aux prédateurs.

De manière générale, le karst va être influencé par trois paramètres clés : la température, l'eau, et le dioxyde de carbone. Ce dernier est un paramètre complexe à appréhender du fait qu'il peut varier rapidement du fait des variations de pression atmosphérique ainsi que de ses différentes sources : sol et humus (SC), des roches plus en profondeur (GC), de l'air et des eaux de pluie. Le SC et GC vont se déplacer au gré des infiltrations d'eau et des variations de pressions atmosphériques. En dépression, souvent accompagnée de précipitations, l'air présent dans le karst va être expulsé, aspirant le SC et le GC, eux-mêmes poussés vers le karst par les eaux d'infiltration. Quand la pression augmente, l'air est comprimé et repousse l'air extérieur vers les cavités limitant les infiltrations de SC et GC dans les cavités (Fig 8).

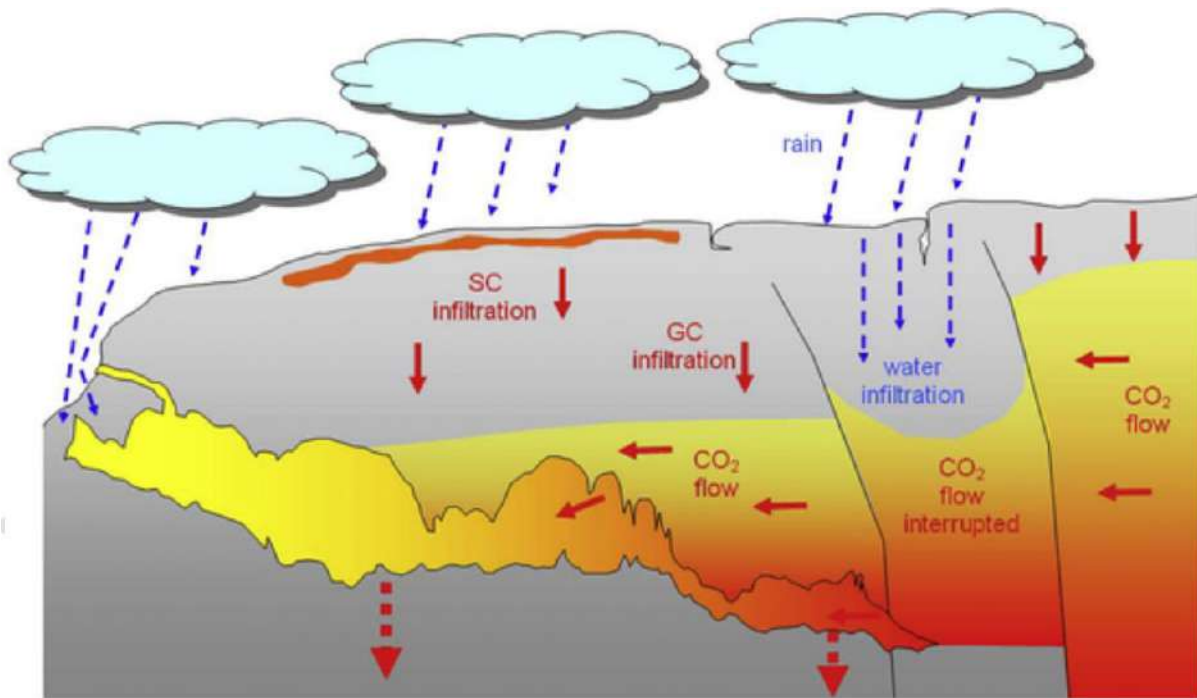


Figure 8 : Représentation schématique des entrées de CO₂ dans l'atmosphère de la Grotte Chauvet (Bourges et Al., 2020).

Enfin, le karst peut aussi être directement impacté par les activités humaines telle que l'exploitation (minéral, phosphates, calcaire, salpêtre...), l'aménagement ou tout simplement la fréquentation humaine qui, comme les chauves-souris, peut entraîner des modifications dans les concentrations de dioxyde de carbone et la température. Des effets indirects s'illustrent par exemple par la pollution des eaux souterraines ou le climat.

Comprendre les enjeux liés au karst, pour aller plus loin :

Paran F., Graillot D., Cadilhac L. (Coord.). (2022). *Connaître et quantifier les échanges hydrauliques karst / rivière. Recommandations méthodologiques. Retour d'expérience d'études menées sur les gorges de la Cèze* (30) (p. 142). Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Prompt, E., & Faverot, P. (2015). *Les milieux karstiques patrimoines de la Terre et des Hommes* (Les cahiers techniques, p. 32). Conservatoire d'espaces naturels Rhône-Alpes.

LES FACTEURS D'INFLUENCE

Ce réseau de cavités est concerné par des enjeux de conservation très forts, à savoir l'accueil d'importantes populations de chiroptères, l'habitat unique de nombreuses espèces d'invertébrés endémiques ainsi que l'ensemble du patrimoine géologique et archéologique remarquable.

Les objectifs de conservation peuvent se résumer en **deux objectifs à long terme, 1)** le maintien ou l'amélioration de l'état de conservation des **populations de chiroptères cavernicoles** et **2)** le maintien ou l'amélioration de l'état de conservation du **karst**.

Ce second objectif à long terme se traduit notamment par la conservation du karst comme habitat et supports d'enjeux patrimoniaux tels que la faune invertébrée, la géologie ou l'archéologie par exemple.

Ces objectifs à long terme s'atteignent par le biais d'une gestion (ou absence de gestion) se traduisant par des objectifs opérationnels. Afin d'atteindre ces objectifs opérationnels, il convient d'intervenir sur des facteurs d'influence qui contraignent ou facilitent les enjeux de conservation pour atteindre l'objectif à long terme fixé.

Tableau 2 : Facteurs d'influence, pressions et effets sur l'état des enjeux analysés.

Facteurs d'influence	Pressions	Effet sur l'état de l'enjeu
Microclimats du karst	Modification des paramètres climatiques	Modification de la répartition des microclimats, des espèces, des zones de concrétionnement, de dissolution (point de rosée)
	Modification des interactions physico-chimiques	Modification de l'intégrité du karst et des vestiges archéologiques
Pastoralisme / Agriculture / Sylviculture	Evolution de l'apport en eau	Possibilité d'assèchement ou d'apport en eau du karst – humidité relative
	Modification de l'occupation du sol et donc des transferts et microclimats du karst	Modification de la répartition des microclimats, des espèces, des zones de concrétionnement de l'intégrité du karst et des vestiges archéologiques
	Modification des habitats de chasse et de la disponibilité en invertébrés	Augmentation/diminution de la ressource alimentaire pour les chauves-souris. Modification des corridors et accès aux gîtes.
	Modification dans le stockage et la production de CO ₂ dans le sol	Accélération/diminution/modification des interactions physico-chimiques dans le karst.
	Pollution, incendie	Modification de l'intégrité du karst et des vestiges archéologiques, atteinte à l'état de conservation des habitats et des espèces.
Spéléologie et tourisme	Dérangement, prélèvement, destruction	Fuite, affaiblissement, destruction, disparition des espèces.
	Modification des paramètres climatiques	Modification de la répartition des microclimats, des espèces, des zones de concrétionnement.
	Modification des interactions physico-chimiques	Modification de l'intégrité du karst et des vestiges archéologiques

Les facteurs d'influence correspondent à deux grands types, à savoir ceux pour lesquels le gestionnaire va pouvoir intervenir (fréquentation du site, aménagements, couvert végétal, etc) et ceux pour lesquels il n'en aura pas (changements globaux par exemple). Ici, nous faisons le choix de nous intéresser uniquement aux facteurs d'influence sous emprise du gestionnaire. Ils sont déclinés selon les types de pression et leur effet sur l'état de l'enjeu (Tab. 2).

Les microclimats au sein des cavités

Bien que la variabilité des paramètres climatiques, en milieu hypogé, soit bien inférieure à ce qu'on observe en milieu épigé, elle reste observable dans le temps et dans l'espace. Le karst est un habitat en trois dimensions et relativement « poreux » ce qui induit de la variabilité dans les paramètres climatiques qui composent son climat. La topographie, les arrivées d'eau, les saisons, le vent, les activités extérieures, l'activité de la faune sont autant de paramètres qui vont venir contribuer à cette variabilité.

L'air, étant un fluide, va donc se répartir de façon non homogène dans la cavité en fonction de sa densité et des mouvements de convection inhérents au site. Cela participe à la présence de microclimats, c'est-à-dire des conditions climatiques précises réparties en des zones très localisées. Ces microclimats ne sont en rien figés, ils évoluent au gré des facteurs d'influence propre au massif karstique et à sa zone d'interdépendance.

La notion de microclimat est déterminante pour la conservation des enjeux du site puisqu'ils vont influencer sur la répartition des espèces, la formation de concrétion ou sur l'intégrité de vestiges archéologiques.

Le rôle des habitats de surface

Comme évoqué précédemment, le karst n'est pas un milieu clos dépourvu de relation avec les milieux épigés. Au contraire, il est totalement dépendant de l'infiltration des eaux ou des interactions biologiques liées à la présence de faune et flore dans le sol par exemple.

En effet, la genèse et le fonctionnement karstique sont essentiellement liées à la présence d'eau et de dioxyde de carbone, l'occupation du sol en surface va directement influencer sur le relargage des eaux de pluie ou de ruissellement, l'activité microbiologique du sol et donc la présence de dioxyde de carbone issu de la respiration (Bourges et al., 2020). Le couvert végétal peut aussi jouer un rôle d'atténuation ou d'accentuation de la température du karst par l'ensoleillement.

Des événements ponctuels tels qu'une pollution ou un incendie peuvent avoir des répercussions directes sur les interactions physico-chimiques à l'œuvre ainsi que sur les microclimats du réseau (Coleborn et al., 2016).

Enfin, les habitats de surface vont aussi influencer directement certaines espèces comme les chauves-souris qui peuvent être dépendantes, favorisées ou diminuées par la structure des paysages, leur connectivité et leur productivité. De façon indirecte, les chauves-souris jouant un rôle important dans les nombreuses interactions physico-chimiques et microclimatiques d'une cavité, le bouleversement des habitats de surface peut engendrer des répercussions sur toute la chaîne trophique du karst.

Les activités humaines souterraines

L'histoire humaine est indissociable des milieux souterrains. Abri, lieu de culte, de chasse, de recherche ou de pratique sportive, les cavités souterraines ont joué - et jouent toujours – un rôle important pour les êtres humains en Ariège, comme ailleurs. C'est d'ailleurs dans les cavités que nous retrouvons les traces les plus anciennes de nos ancêtres *Homo sapiens* ou de plus proches parents comme *Homo neanderthalensis* par exemple.

De récentes découvertes faites dans le Tarn ont mis au jour les premières constructions humaines connues, datant de plus de 176'000 ans et attribuées à *Homo neanderthalensis* (Jaubert et al., 2016), bien avant que ne soit peint le Salon noir de la Grotte de Niaux qui, lui, aurait été peint il y a environ 13'000 ans par *Homo sapiens* durant le Magdalénien. Nous savons donc que l'Homme a « toujours » eu une influence sur les cavités en les aménageant, peignant, gravant ou en y apportant de la matière organique liées aux restes de chasse ou encore liées aux restes humains tout simplement.

Les cavités ariégeoises ont révélé de nombreuses traces d'occupation du Néolithique, de l'âge de bronze, du fer et jusqu'à l'époque actuelle. Malgré l'évolution du climat, les grottes ont donc toujours servi d'abri voire d'habitat plus pérenne. Certaines cavités ont aussi montré une potentielle alternance entre l'occupation par les humains et les grands prédateurs (Becam et al., 2021). Plus récemment, des pièces de monnaie, des signatures ou des aménagements plus sophistiqués illustrent cette continuité dans l'occupation des cavernes.

L'arrivée du Christianisme en Europe a installé (ou peut-être exacerbé) de nombreuses superstitions liées aux cavernes. Il faudra attendre le Siècle des Lumières pour que les pères de la spéléologie observent les cavités selon un prisme scientifique et produisent de premières publications. Cette science, totalement liée à la modernisation des pratiques de progression souterraine, voit un premier essor au milieu du XIXème siècle, porté par les courants littéraires du réalisme puis du naturalisme. Elle est généralement réservée à des notables, lettrés, qui décriront les cavités pour leur géologie, leur topographie, la faune qu'elles abritent ou encore l'archéologie.

A la même époque se développe l'exploitation des cavités pour les phosphates. L'utilisation de grottes comme carrière est bien sûr plus ancienne (pour les argiles par exemple) mais l'exploitation du phosphate est réalisée à plus grande ampleur et a, dans certaines cavités, largement fait disparaître le remplissage des galeries. D'autres types d'exploitation s'en suivront allant de l'extraction des roches sédimentaires aux minerais et minéraux à portée industrielle.

L'intérêt pour les cavités souterraines bénéficie d'un nouvel essor lors de la seconde moitié du XXème siècle avec le développement des sports de pleine nature. La spéléologie n'est plus simplement une science mais devient aussi une pratique sportive. De nombreux clubs se structurent et mènent l'inventaire des cavités en les localisant, topographiant, les décrivant le plus précisément possible, en allant du dessin à la topographie 3D. La spéléologie désigne désormais l'ensemble des pratiques sportives et scientifiques se rapportant aux milieux souterrains.

Le développement moderne de la spéléologie a conduit de nombreuses personnes à s'intéresser aux milieux souterrains, contribuant ainsi à un apport colossal sur l'histoire humaine mais aussi le fonctionnement du karst, des aquifères et toute la faune cavernicole associée. Ce développement s'est accompagné de modifications des cavités pour des raisons de progression souterraine (désobstruction,

équipement de sécurité), d'effet sur les microclimats (notamment dans les cavités touristiques à forte affluence), de contamination (voiles bactériens, champignons, etc.) (Del Rosal et al., 2021) ou de destructions directes liées à la recherche de minéraux, concrétions, vestiges archéologiques ou espèces animales.

Alors que les invertébrés semblent principalement menacés par la pollution des eaux d'infiltration et par l'extraction (mine, carrière), la pratique de la spéléologie au sens large peut engendrer - **de façon volontaire ou involontaire** – des dégâts irrémédiables sur l'intégrité des gisements archéologiques, des concrétions ou sur la pérennité des colonies de chauves-souris. Evidemment, la Fédération Française de Spéléologie et les clubs prônent une déontologie maximale concernant la conservation des milieux souterrains, les spéléologues en étant les meilleurs gardiens. Le défi actuel pour la sensibilisation des usagers réside dans le développement d'une pratique plutôt « individuelle » sans intégrer les clubs et les fédérations. Cela représente un réel problème pour la transmission des connaissances mais aussi pour la médiation qui ne peut se faire aussi facilement que par les fédérations sportives.

LE CLIMAT PASSÉ, PRÉSENT, FUTUR

Caractérisation du climat local – deux échelles d'analyse

Estimer la vulnérabilité des aires protégées du Plantaurel, des Avants-Monts et des Petites Pyrénées face au changement climatique nécessite deux niveaux d'analyse climatique : le karst qui abrite les principaux enjeux de conservation et les habitats épigés environnants constituant la zone d'interdépendance. Cette dernière notion fait référence aux répercussions environnementales et socio-économiques que peuvent avoir l'évolution des paramètres climatiques de notre aire protégée mais à plus vaste échelle. Par exemple, on peut se questionner sur l'évolution des habitats de chasse des chauves-souris. Sous l'effet du changement climatique, le gîte (grotte) peut éventuellement garder des conditions favorables à une espèce mais ses zones d'alimentation peuvent, elles, s'améliorer, se dégrader ou disparaître.

L'analyse séparée de ces échelles paysagères se justifie par les différences de « comportement » de la plupart des paramètres climatiques qui nous intéressent.

Les habitats de surface, dits « épigés »

L'analyse du climat contemporain s'effectuera sur la base des données température de la station météorologique du Mas d'Azil sur la période 1952-2015 (63 ans) et des données pluviométriques de la station météorologique Saint-Girons-Lorp sur la période 1950-2015 (65 ans) mises à disposition via l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC).

Le karst

Le manque criant de données acquises sur le long terme en milieu souterrain ne permet pas de poser de réels constats quant à l'évolution du climat sous terre. Cependant, une des cavités (la grotte du Mas d'Azil)

de la zone d'étude possède un suivi depuis 2014. Les données, non publiées, ne peuvent être utilisées dans notre analyse mais nous nous fierons aux avis d'expert de François Bourges (GE Conseil) et Didier Cailhol.

Contrairement à « l'extérieur », les paramètres climatiques « sous terre » évoluent à une tout autre échelle de temps et d'espace. Dans les galeries dites « confinées », les paramètres climatiques que sont la température ou l'humidité sont relativement stables. La température peut montrer une amplitude de quelques dixièmes de degrés au long de l'année et les variations de la température à l'extérieur n'auront que très peu d'impact sur les variations à l'intérieur du karst. Il en va de même pour l'humidité voire le CO₂ bien qu'ils puissent montrer des variations saisonnières de plus grande amplitude. La température de ces milieux confinés est donc souvent corrélée aux températures annuelles extérieures. Il convient cependant de prendre en considération l'influence d'autres paramètres tels que la profondeur, d'éventuelles sources de chaleur ou encore des phénomènes climatiques complexes qui pourraient venir modifier ou biaiser cette généralité.

Il est donc intéressant de noter que la météo n'a donc pas ou peu d'influence directe sur les parties confinées des réseaux souterrains (Beltrami et al., 2005) à l'exception de la pression atmosphérique (Bourges et al., 2020). Ce paramètre est celui qui va expliquer l'essentiel des variations microclimatiques des réseaux confinés. L'évolution journalière ou saisonnière de la pression atmosphérique peut même entretenir des phénomènes de convections ou tout simplement de déplacements de masse d'air au sein d'un réseau. Le cas des réseaux non confinés, soumis de fait à des phénomènes d'aspiration, d'influence de rivières temporaires ou de porches très exposés au vent par exemple (il existe de nombreux autres exemples), est intermédiaire dans le sens où certains paramètres climatiques vont être plus sensibles aux variations extérieures par la configuration du site.

L'analyse de l'évolution du climat est tout de même possible et intéressante à mener si on possède les données nécessaires. Des phénomènes de dérives climatiques ont déjà été observés dans plusieurs cavités de France (Genty et al., 2017). Etant donné que, dans les réseaux confinés, les variations météorologiques saisonnières sont gommées, on observe plus rapidement les effets de dérive climatique (Perrier et al., 2005).

Méthodologie

Le récit climatique de notre zone d'étude est basé sur des données locales observées (Mas d'Azil et Saint-Girons/Lorp pour l'analyse de l'évolution du climat passé de 1952 à 2015 et sur des données modélisées issues de la plateforme DRIAS pour l'analyse du climat futur. Deux modèles climatiques régionaux ont été utilisés sur DRIAS, à savoir :

- Modèle CNRM-CM5 / ALADIN53 ; correction ADAMONT (données modélisées passées et futures)
- Modèles IPSL-CM5A / WRF331F ; correction ADAMONT (données modélisées futures)

Nous avons ensuite relevé les données modélisées à la maille (10x10km, ETRS89, zone UTM 30N, EPSG : 25830) pour chaque horizon temporel (2050, 2070 et 2100), chaque grotte (afin d'apporter la variabilité nécessaire à une extrapolation à l'échelle du massif), chaque modèle et chaque scénario. Les scénarios étudiés sont les suivants :

Tableau 3 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et. Al, 2010)

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Limitation forte d'émission de GES

RCP 4.5	~4,5Wm-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Limitation dees émission de GES
RCP 8.5	>8,5Wm-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Production constante de GES

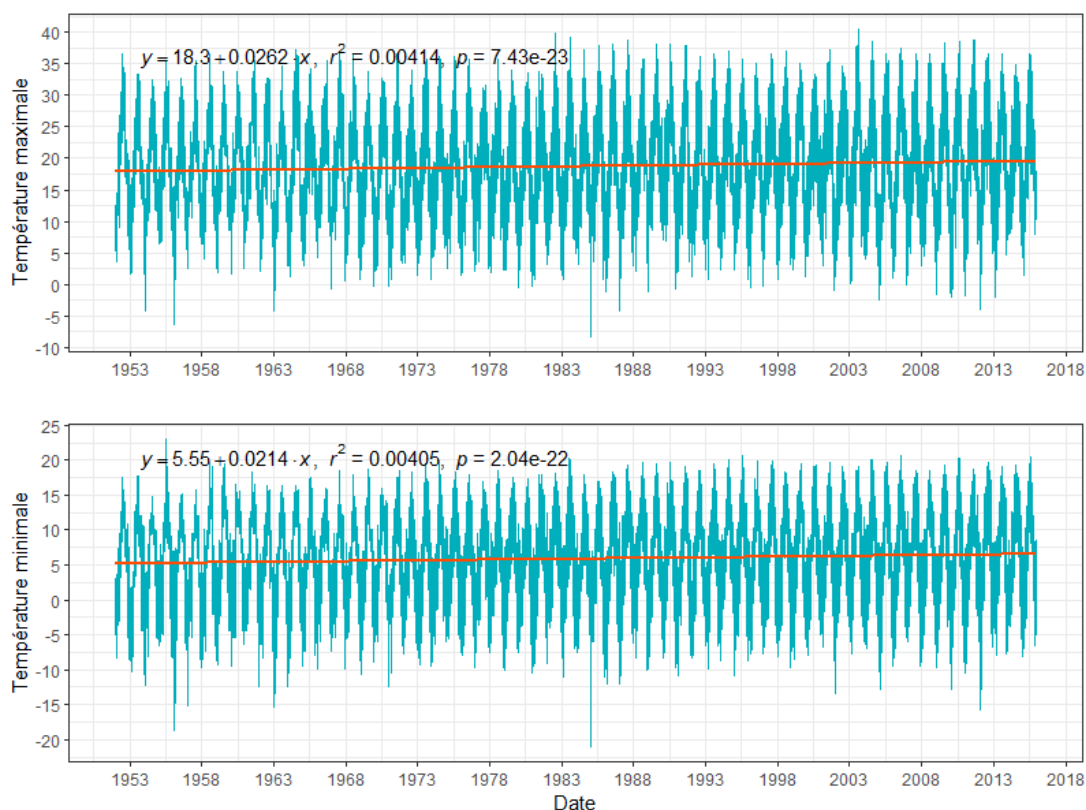
Le choix de ces 3 scenarios a été fait dans le but d’explorer différentes trajectoires climatiques. L’intégration du scenario RCP 2.6, bien que peu probable aux vues de la fermeté et de la rapidité à adopter les mesures nécessaires pour l’atteindre selon le dernier rapport du GIEC (Allen et al., 2018), nous a semblé intéressant à étudier comme base de comparaison aux autres scenarii. Il correspond à un maintien de la température en dessous du seuil des 2°C.

Les données issues des modélisations ont été analysées à l’année, ce qui semble plus logique pour les comparer à des données recueillies à l’intérieur de cavité.

Le climat actuel du Plantaurel, des Petites Pyrénées et des Avants-Monts

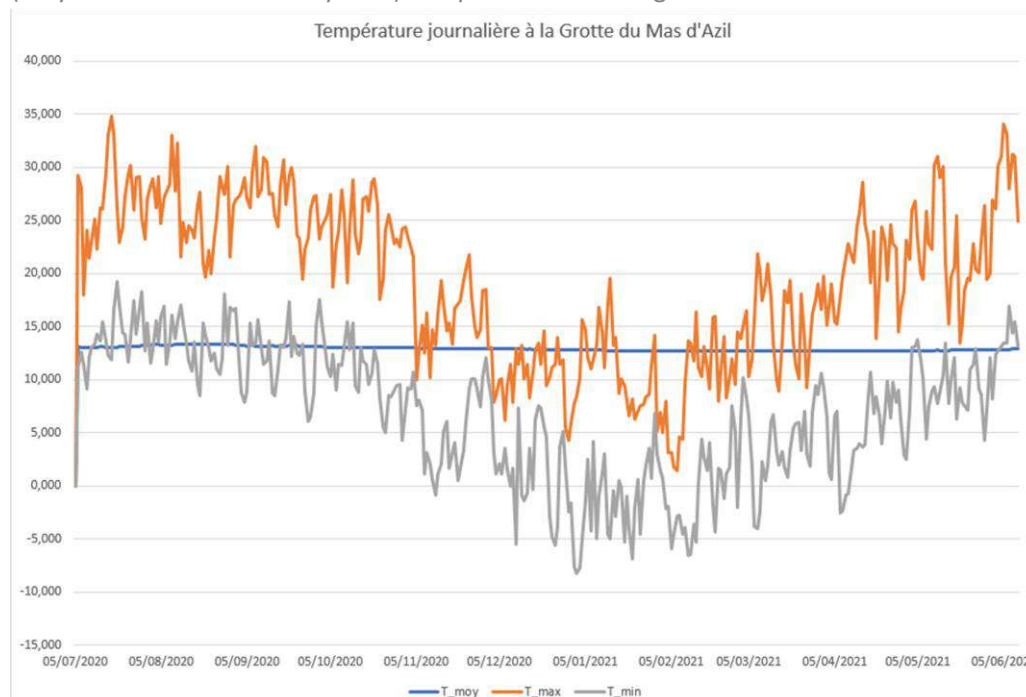
La température atmosphérique

Le climat de la période actuelle considérée (1950 à 2015) sur la zone d’étude est un climat océanique altéré issu des influences des climats océaniques, méditerranéens et montagnards (Joly et al., 2010). Il se caractérise par des températures journalières moyenne de 11,9°C, minimales d’environ 6,7°C et maximales de 19,8°C. Durant la période étudiée, on observe une hausse moyenne de 0,21 à 0,26°C par décade ainsi qu’une hausse des amplitudes thermiques. C’est un résultat cohérent à la moyenne observée sur le massif pyrénéen puisque la hausse moyenne des températures annuelles entre 1959 et 2010 est de 0,23°C par décade selon l’OPCC. L’évolution à la hausse des températures minimales présage aussi une diminution des



Et sous terre ?!

De rares données ont été mises à disposition par les équipes des PCR Grotte du Mas d'Azil et PCR Biocorrosion. Elles illustrent la différence de variabilité quotidienne de la température entre l'extérieur (station du Mas d'Azil) et la salle Mandement de la grotte éponyme. Les variations perceptibles à la résolution du graphique s'expliquent par la présence de visiteurs dans la salle. Cette représentation illustre la pertinence de mesurer les évolutions du climat sous terre en réduisant l'erreur standard (moyenne de l'écart à la moyenne) lorsqu'on mesure la significativité de l'évolution de la température.



épisodes de gel. La quantité de neige dans les Pyrénées est, elle aussi, en baisse et devrait continuer de baisser avec les années (OPCC-CTP, 2018).

Figure 9 : Evolution des températures minimales et maximales au Mas d'Azil de 1952 à 2015

La pluviométrie

La pluviométrie actuelle est comprise entre 900 et 1057mm annuels sur la zone d'étude. Les données disponibles sur la station de Saint-Girons montrent des précipitations mensuelles constantes moyennes de 86,6mm (comprises entre 62,9 et 114,5mm) pour un cumul annuel moyen de 1039mm lors des dernières 30 années (1991-2020). Entre 1950 et 2015, la pluviométrie annuelle n'a augmenté que de 4mm soit environ 0% ! Même si la tendance est à une très légère hausse, elle conforte une faible évolution prévue sur ce secteur des Pyrénées durant les dernières périodes climatiques. A l'échelle du massif, la pluviométrie annuelle montre une baisse de 2,5% sur la période 1959-2010.

Précipitations à Saint-Girons – Antichan

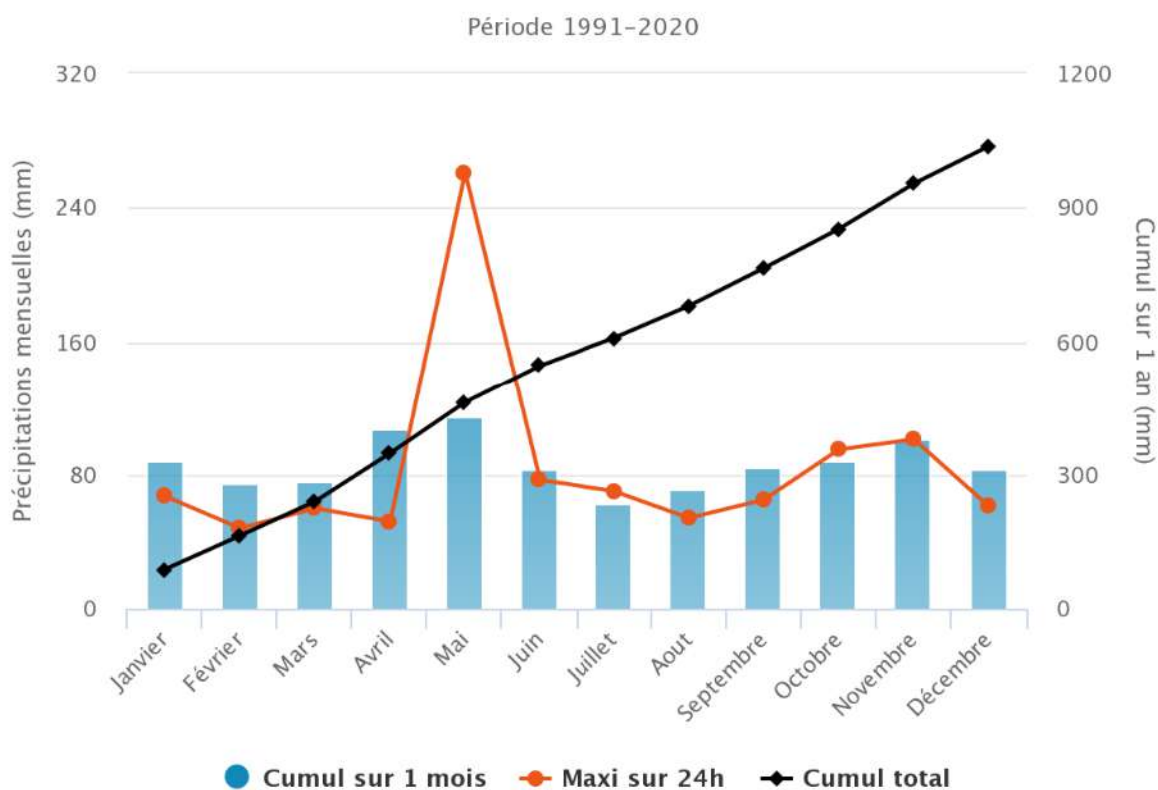


Figure 10 : Précipitations de la période 1991-2020 de la station Saint-Girons – Antichan

Les évolutions du climat du Plantaurel, des Petites Pyrénées et des Avants-Monts

La température atmosphérique

Le climat change sur le Plantaurel et les massifs attenants depuis plus d'un demi-siècle. Bien qu'aucune tendance nette ne se dégage pour les précipitations, la température, elle, augmente. Les données historiques montrent une augmentation linéaire mais il n'est pas possible de savoir comment évoluera la température dans le futur, dépendant largement des activités anthropiques mais aussi des nombreuses interactions biotiques et abiotiques. Nous savons cependant que la température va augmenter jusqu'en 2050 (du fait de l'inertie induite par le système climatique) et que la suite dépendra entièrement des choix politiques et de gestion. L'analyse des scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la zone d'étude permet de se positionner au sein d'une fourchette, bien que large, mais qui illustre concrètement les trajectoires possibles en fonction des choix politiques.

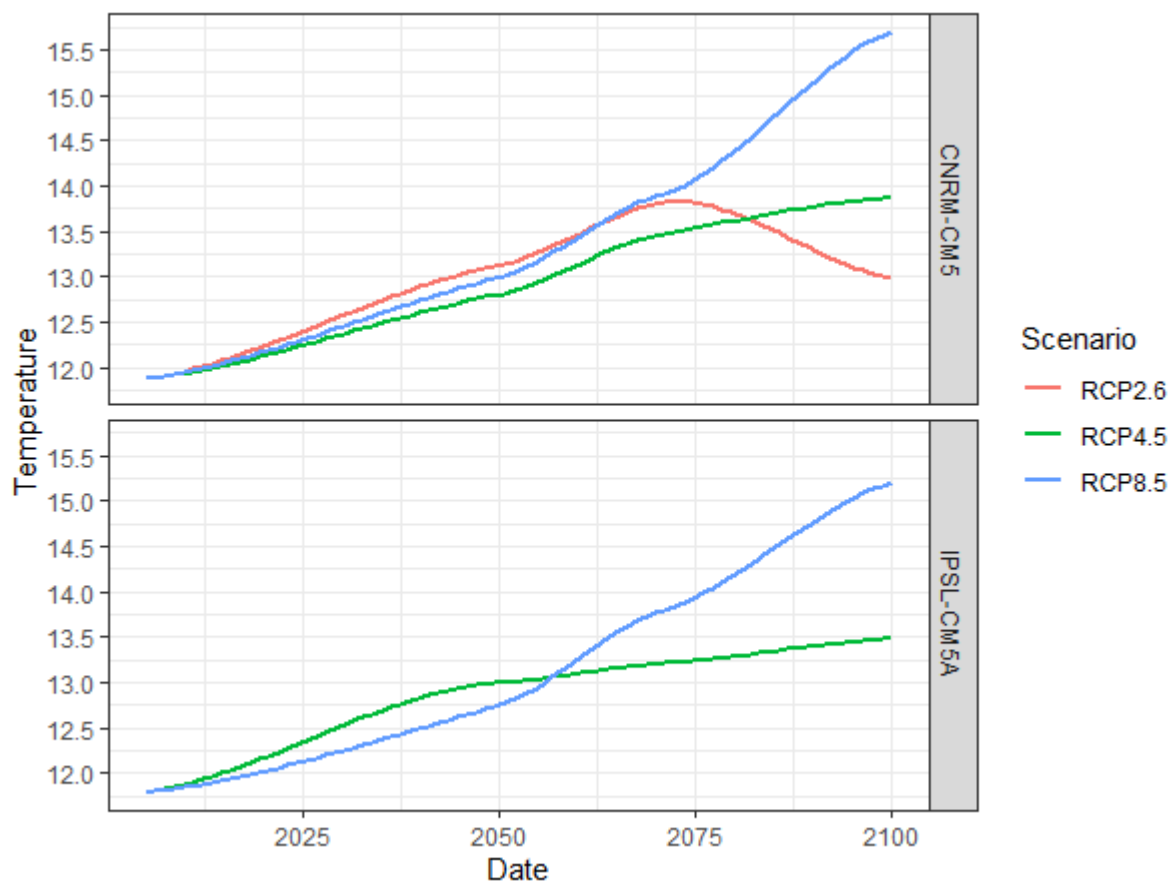


Figure 11: Illustration des trajectoires de température sur le Plantaurel en fonction des scénarios et des modèles étudiés. Chaque ligne illustre la valeur médiane de l'intervalle de confiance.

Le modèle IPSL-CM5A / WRF331F ; correction ADAMONT ne propose pas de modélisation du scénario RCP 2.6. Pour les deux autres scénarios, ils sont assez proches du modèle CNRM-CM5 / ALADIN53 ; correction ADAMONT bien que ce dernier propose des valeurs légèrement inférieures (~0,5°C d'ici à 2100). Le choix d'intégrer ces deux modèles, plus ou moins optimistes ou négatifs, permet de considérer une fourchette dans laquelle pourrait s'inscrire le climat futur. Ainsi, nous intégrons l'incertitude liée aux modèles en discutant les valeurs extrêmes qu'ils proposent.

L'écart de température entre le scénario « optimiste » RCP2.6 et le scénario « business as usual » RCP 8.5 est important puisqu'il est supérieur à 2°C d'écart. Le premier scénario montre une stabilisation à une température moyenne de 13°C après un pic à +2°C durant la seconde moitié du siècle pour enfin se stabiliser à une hausse de température de +1°C/1,5°C. Pour le second, la température annuelle moyenne est plus de 15,5°C à l'horizon lointain, soit presque 4°C de plus que la période de référence du modèle (1976-2005).

En comparaison, la hausse observée sur le Mas d'Azil de 1952 à 2015 est comprise entre 1,4 et 1,7°C. Si la température poursuit sa hausse, le pic des +2°C devrait survenir entre 2035 et 2046, soit près d'un quart de siècle plus tôt que les prévisions les plus pessimistes (RCP 8.5 / CNRM-CM5).

En bref

L'analyse de l'évolution du climat est un exercice complexe car il nécessite d'extraire des tendances exploitables à partir de paramètres climatiques variant fortement dans le temps. Les milieux souterrains, plus ou moins protégés par les aléas météorologiques nous informent plus rapidement sur ces tendances du fait de la stabilité de ces paramètres au sein des galeries les plus confinées.

La station météorologique du Mas d'Azil montre une augmentation de la température annuelle moyenne d'environ 0,21 à 0,26°C par décennie depuis 1952. Cette augmentation présage déjà un dépassement des 2°C avant 2050, soit environ 20 ans plus tôt que ce que propose le scénario RCP 8.5 considéré comme le scénario « pessimiste ». Ces évaluations méritent donc d'être réévaluées à la lumière des nouveaux scénarios utilisés par le GIEC (Riahi et al., 2017).

Et sous terre ?

L'absence d'antériorité quant aux données recueillies à l'intérieur de la grotte du Mas d'Azil nous invite à la prudence mais doivent aussi nous alerter car elles montrent un réchauffement de 0,76 à 1,1°C par décennie depuis 2014. Les résultats obtenus dans de nombreuses cavités illustrent une accélération de la hausse des températures autour des années 2010/2014, ce qui pourrait expliquer en partie cette nette différence avec la station météorologique située à proximité de la grotte. L'analyse du climat par périodes de références pourrait donc inclure cette observation et comparer des périodes antérieures et postérieures à 2010 pour une meilleure estimation de ces taux d'accroissement.

La pluviométrie

Les tendances attendues concernant les précipitations dans les Pyrénées sont très dépendantes selon le versant et selon l'axe Est-Ouest. Alors que les précipitations devraient bien diminuer sur le versant espagnol, elles pourraient augmenter près des côtes atlantiques et méditerranéennes en raison de phénomènes de convection provoqués par l'évaporation de l'eau de mer, créant de la condensation qui sera bloquée par les massifs montagneux. Ces phénomènes, semblables aux effets cévenols connus de la façade méditerranéenne du Massif Centrale, peuvent être intenses et irréguliers.

Au centre des Pyrénées sur le versant français, où se trouve le département de l'Ariège, une baisse d'environ 2% est attendue à l'horizon 2050 bien que ces prédictions soient peu significatives (OPCC-CTP, 2018). Cela dit, même à un niveau de précipitations constant, avec l'augmentation moyenne de la température, les phénomènes d'évapotranspiration et la diminution des stocks de neiges créeront sans aucun doute des épisodes de stress hydriques plus importants à l'été avec un écoulement plus rapide des stocks d'eau le long du bassin versant.

Les événements climatiques extrêmes

Les prévisions suggèrent aussi l'augmentation de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes telles que les canicules, les sécheresses ou les pluies torrentielles par exemple. Ces événements peuvent entraîner des conséquences sur les habitats de surface mais aussi sur les habitats souterrains engendrant colmatage ou décolmatage des remplissages par exemple. Nous avons trop peu de recul pour analyser l'effet de ces épisodes extrêmes mais nous savons qu'il peut modifier les écoulements en place et ainsi assécher ou créer de nouveaux apports en eau. Toutes ces conséquences peuvent se résumer par des modifications du karst pouvant engendrer des répercussions rapides sur le patrimoine archéologique protégé par les remplissages et la calcite. Les conséquences sur la faune sont probablement moins importantes en raison de sa mobilité et de la protection qu'offre le karst en tamponnant les variations rapides des paramètres climatiques.

QUELLE ÉVOLUTION FUTURE DES ACTIVITÉS HUMAINES ?

Agriculture et Sylviculture

L'augmentation de la température pourrait accentuer les périodes de sécheresse par l'évaporation et l'évapotranspiration et la diminution des quantités de neiges. Ces modifications pourraient induire des modifications nécessaires dans l'agriculture et la sylviculture.

Aujourd'hui, l'activité agricole principale sur le Plantaurel, les Avants-Monts et les Petites Pyrénées est l'élevage bovin. Des élevages ovins, caprins et équins sont en petit nombre et quelques cultures de céréales et des maraichers sont aussi présents. Cependant, l'élevage bovin, particulièrement en production laitière, consomme au moins deux fois plus d'eau qu'un élevage ovin/caprin à UGB égaux (Boudergue (Coord.), 2010). Ces derniers sont plus adaptés aux climats chauds et pourraient être favorisés à l'avenir pour répondre aux sécheresses. Il existe d'autres races de vaches, plus petites, vivant en région Méditerranéenne qui pourraient être sélectionnées si la capacité d'adaptation des vaches utilisées localement (Gasconne, Casta, Brunes, ...) n'était pas suffisante.

A l'échelle du département, le nombre d'installations est croissant. Sur le Plantaurel, les élus locaux relèvent l'importante demande de maraichers pour s'installer malgré le peu de terres disponibles ou vacantes.

L'évolution de l'agriculture pourrait donc se traduire par une évolution dans les races composant les cheptels ou une diversification vers les élevages des ovins et caprins qui ont des besoins moins importants en eau et qui, de plus, peuvent pâturer des surfaces peu ou pas accessibles actuellement par les bovins. Ceci permettrait aussi de laisser des terres disponibles pour le maraichage ou d'autres cultures.

La sylviculture et plus généralement les dryades forestières (assemblage d'essences forestières représenté par l'essence majoritaire au stade dit « climacique ») devraient, de la même façon que l'agriculture, se voir impactées par l'accentuation des stress hydriques. Les épisodes récents de stress hydriques ont montré que les feuillus les plus vulnérables sont ceux qui se développent sur les sols les plus superficiels (Ecole d'ingénieurs de Purpan, 2022). Il est donc possible que ces conditions climatiques, en contexte calcaire, favorisent une expansion des séries du Chêne pubescent et du Chêne vert dans les boisements spontanés. La plantation de Pins pourrait aussi se voir favorisée.

Spéléologie et Tourisme

Ces activités représentent des facteurs d'influence majeurs puisqu'elles peuvent être une pression face aux enjeux (ou objets) causant le dérangement ou la destruction des chiroptères ou bien l'altération lente des patrimoines archéologiques et géologiques. Mais ces activités sont aussi des facteurs d'influence capitaux pour l'acquisition de connaissances et leur transmission permettant de sensibiliser et d'alerter quant à la fragilité de ces milieux.

La dérive climatique laisse penser que les cavités ariégeoises pourraient abriter des concentrations plus importantes en CO₂ du fait de l'augmentation globale de sa concentration dans l'air mais aussi, de façon indirecte via l'augmentation de la température et donc des interactions microbiennes et autres effets indirects (incendies, disparition du couvert forestier, etc.). Ces phénomènes sont déjà observés dans les karsts de plateaux calcaires (causses) avec couvert forestier se densifiant tels que le Quercy ou le bas Vivarais mais ne sont pas encore renseignés en Ariège. Chaque cavité ayant son propre fonctionnement climatique, nous n'avons pas la possibilité de réaliser des projections pour les sites concernés. Il est possible que le fonctionnement climatique de ces cavités puisse venir compenser localement la tendance à la hausse de ces concentrations. En l'état des connaissances, il paraît judicieux de considérer les différentes hypothèses.

L'augmentation de la température et des concentrations de CO₂ entraîneront des conséquences sur deux paramètres clés : la visite des cavités (spéléologie et tourisme) ainsi que l'archéologie.

Les concentrations de CO₂ dans l'air en milieu souterrain peuvent être 100 fois supérieures aux concentrations mesurées à l'air libre suivant les contextes. De trop fortes concentrations de CO₂ dans l'air respiré peuvent entraîner des conséquences graves allant de difficultés à respirer jusqu'à divers troubles, la perte de connaissance ou l'arrêt respiratoire pouvant provoquer le décès. A l'inverse, certaines cavités telle que la Grotte de Gargas dans les Pyrénées, montrent des concentrations à la baisse du CO₂ révélant l'existence possible de phénomènes régulateurs qui nous échappent encore. Etant donné les taux de CO₂ présents sous terre, de légères diminutions ne présentent d'aucun danger pour la progression souterraine.

Le principal risque pesant sur la progression souterraine est lié aux objectifs de conservation du patrimoine archéologique. **Lorsque des enjeux sont présents, comme à la Grotte du Mas d'Azil, des seuils de température ou CO₂ d'alerte pourrait induire des mesures de conservation face à la fréquentation humaine** visant à réduire, réguler ou diluer le nombre de visiteurs pour garantir des conditions de conservations optimales. Ainsi, le nombre de visiteurs par groupe, en particulier en été, pourrait être réduit et entraîner des conséquences économiques pour l'organisme gestionnaire de la grotte touristique. Dans le cas où de telles mesures ne seraient pas intégrées, il est probable que les vestiges archéologiques soient moins bien conservés et finissent par se dégrader de façon significative.

Le risque lié à la santé, et donc aux concentrations de CO₂, semble faible au sein des cavités concernées mais reste non négligeable. Si les concentrations de CO₂ dans les grottes ariégeoises devait impacter la progression souterraine, cela impliquerait probablement une utilisation plus généralisée de sondes à CO₂ et l'orientation des sorties en fonction des cavités connues pour contenir de fortes concentrations. Les cavités utilisées par les Brevets d'Etat (BE) pour leur activité professionnelle devraient faire l'objet d'investigations plus poussées afin de prévenir ce risque supplémentaire. Des cavités de « report » pour ces activités professionnelles pourraient voir leur fréquentation augmenter, ce qui demanderait une intégration des enjeux de conservation en amont afin de définir la sensibilité des sites par rapport à la pratique.

L'évolution du contexte climatique pourrait aussi favoriser le développement de levures ou champignons toxiques au contact du guano. Certaines maladies telles que les histoplasmoses sont liées au contexte climatique et la transmission de pathogènes des chauves-souris à l'Homme est un risque non négligeable lié à la dérive climatique et à prendre en compte au sein des sites fréquentés par l'Homme.

Alors qu'il est attendu une hausse généralisée des températures, **l'attrait pour l'exploration des grottes en période de fortes chaleurs pourrait augmenter**, incitant tout un chacun à visiter des cavités, plus fraîches, **mais où les risques d'accident pourraient être accrus à cause du CO₂**. Les efforts de communication devraient être renforcés pour prévenir ces risques s'ils devaient survenir.

Bien que le rôle du CO₂ dans les interactions chimiques du karst soit majeur, seule la température des grottes est aujourd'hui un indicateur avéré et incontestable de la dérive climatique au sein des sites concernés. Le CO₂, l'humidité et l'aérogénie en général sont des paramètres supplémentaires à surveiller qui pourraient permettre de décrire les changements dans les processus naturels pouvant s'opérer à l'échelle locale.

QUELLE ÉVOLUTION FUTURE DES OUTILS ET MOYENS DE GESTION ?

Caractérisation des outils et moyens de gestion La gouvernance

Les cavités ariégeoises présentent de très nombreux cas de figure et les 4 cavités sélectionnées pour ce diagnostic de vulnérabilité l'illustrent à merveille. Au niveau du foncier, de nombreuses grottes ariégeoises appartiennent à des propriétaires privés, des collectivités et quelques-unes à l'ANA-CEN Ariège. De ce fait, chaque propriétaire a la capacité d'exercer son droit de propriété sur site. Certains propriétaires sont gestionnaires uniques mais, souvent, ces cavités font partie de périmètres classés au titre de Natura 2000, des Monuments Historiques, Opération Grand Site et autres. Ceci implique que ces cavités puissent faire partie d'un espace plus vaste lui-même sous la gestion d'une structure de type collectivité ou associative.

Ici, la Grotte du Mas d'Azil est partagée entre des propriétaires privés et une collectivité, à savoir le Conseil Départemental. Ce dernier est gestionnaire de la grotte, en particulier pour son exploitation touristique. Mais cette cavité fait aussi partie d'un site Natura 2000 animé par le PNRPA qu'il inclut intégralement en son sein. Pour ses vestiges archéologiques, des mesures de conservation et un suivi est mis en place par la DRAC et des universitaires.

La Grotte du Pouech de la Mine d'Unjat, elle, est une propriété communale de la Bastide-de-Sérou mais dont les terres sont gérées par des agriculteurs conventionnés. Un comité de suivi du site a été proposé par l'ANA-CEN09 dans le cadre d'une convention de gestion afin que les nombreux acteurs de ce site puissent se rencontrer, échanger et monter des projets en commun. La grotte bénéficie d'un arrêté municipal réglementant l'accès et le CDS09 s'occupe de l'attribution des accès aux clubs spéléologiques extra-départementaux.

La Grotte de Mérigon est une petite cavité acquise par l'ANA-CEN09 sans particularité en termes de gouvernance.

La Grotte de Tourtouse est un site privé qui regroupe un site Natura 2000 géré par le PNRPA un arrêté préfectoral de protection de biotope géré par la DDT09. Elle fait l'objet d'une démarche d'acquisition foncière par l'ANA-CEN09.

Les financements

L'ensemble des sites remarquables du département, comprenant les 4 cavités du projet, est concerné, du fait des nombreux enjeux et gestionnaires, par de nombreux financeurs. Souvent, la gestion de ces sites bénéficie de plusieurs sources de financement qui permettent de développer différents types d'activité.

Les suivis naturalistes sont principalement financés, pour les espèces prioritaires de la directive « Habitats Faune Flore », par le réseau Natura 2000. C'est particulièrement le cas des grottes de Tourtouse et du Mas d'Azil qui sont classées en Natura 2000. Lorsque les sites n'intègrent pas le réseau Natura 2000, ils bénéficient de financement de la Région Occitanie pour la gestion des sites du conservatoire. Cela nécessite donc un engagement des propriétaires via conventionnement, ORE ou même une acquisition par le conservatoire. Les autres sites sont suivis bénévolement.

L'acquisition des terrains ou la mise en défend des sites est plutôt financée par la Région Occitanie ou les propriétaires qu'ils soient privés, associatifs ou même publiques tel que l'Office National des Forêts. Il en va de même pour des études scientifiques proposées dans le cadre d'un plan de gestion, souvent dans l'objectif d'améliorer la gestion du site ou ne serait-ce que la compréhension des processus en vigueur.

Les recherches archéologiques sont, elles, principalement financées par la DRAC, le Conseil Départemental ou par l'Agence National de la Recherche comme les recherches en cours sur la bio-corrosion au Mas d'Azil.

Le PNRPA, lui, joue son rôle d'animateur en facilitant l'accès aux financements européens via la DREAL aux agriculteurs des sites concernés ou pour les suivis mis en place dans le cadre du réseau Natura 2000.

Actuellement, la compétence Natura 2000 de la DREAL Occitanie est en cours de transfert vers la Région Occitanie qui assurera l'animation et le financement des sites.

Perspectives d'évolution des outils et moyens de gestion

Evolution des financements actuels

En France, les dépenses liées à la protection de l'environnement sont en augmentation. Elles concernent des domaines d'activité larges allant de la gestion des déchets radioactifs à la gestion de l'eau en passant par la biodiversité. Ces dépenses liées à la biodiversité étaient inférieures à 2% des dépenses totales en 2000 qui s'élevaient à environ 32,5 milliards d'euros. Sur la période 2000-2018, la part dédiée à la biodiversité a atteint 2,6% pour un budget de 55,8 milliards d'euros (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires & Ministère de la Transition énergétique, 2021).



Alors que les financements publics semblent avoir atteint un plateau, les dépenses en faveur de l'environnement sont de plus en plus financées par les entreprises et les foyers. Le constat semble comparable à l'échelle européenne malgré des statistiques relativement anciennes (Eurostat, 2012).

Les dépenses liées à la biodiversité représentent donc une part faible des dépenses totales liées à l'environnement et, même si elles augmentent, la part d'augmentation est principalement financées par les entreprises et les foyers. L'implication de l'Europe et de l'Etat (et autres organismes publiques) n'apparaît donc pas significative dans cette hausse or ils représentent l'essentiel des financements disponibles pour la gestion de ces milieux. Cependant, l'investissement de la Région Occitanie pour sa politique environnementale a le mérite d'être souligné. Cet investissement mériterait cependant d'être analysé afin d'en tirer une courbe de tendance. Il en va de même avec le budget alloué à Natura 2000 pour lequel nous n'avons pas les données nécessaires à cette analyse.

L'accès à ces financements, parallèlement, s'est complexifié au niveau des demandes de subvention. L'ingénierie nécessaire à ces demandes et les délais de paiements favorisent donc les plus grosses structures pour l'accès à ces fonds et augmentent la part de gestion administrative dans le temps financé.

Projet de Réserve Naturelle Nationale

Les enjeux du patrimoine naturel que représentent ces sites sont bien identifiés depuis de nombreuses années, en premier lieu grâce à l'effort de recherche produit par le Laboratoire Souterrain de Moulis. En réponse à cette richesse et à la vulnérabilité des milieux souterrains, le Laboratoire Souterrain de Moulis a proposé au début des années 2000 une réserve naturelle regroupant de nombreux sites aux enjeux chiroptères et invertébrés. Malheureusement, ce projet n'a pu aboutir en raison de l'égarement de pièces administratives obligatoires.

Or, ces sites regroupant des enjeux communs, des acteurs communs, des sources de financements communes parfois, éparées souvent, la relance de ce projet paraît répondre à la complexité de la gestion de ces sites et l'accès aux différentes sources de financement (Fig. 12).

Le statut de Réserve Naturelle Nationale assurera un investissement minimal de la part de l'Etat et favorisera, avec l'aide d'une équipe de gestion, l'accès aux financements via un seul gestionnaire d'une seule aire protégée. L'accès aux financements et donc aux outils de gestion de ces sites semble pouvoir augmenter grâce à l'outil « Réserve Naturelle ». Ce projet pourrait aboutir d'ici 2025 (Fig. 12).



Figure 12: La localisation de la totalité des sites présélectionnés sur le PNR des Pyrénées Ariégeoises, ainsi que des principaux massifs (source : lettre aux partenaires du PNR n°41 de Mars 2021).

QUELLE EVOLUTION FUTURE DU PATRIMOINE NATUREL ?

L'évolution du climat sur la zone d'étude va se traduire par une hausse des températures et une baisse des précipitations avec sécheresses plus marquées. Ceci devrait être accentué par une baisse de la quantité de neige avec une fonte plus précoce et donc un apport d'eau moins régulier dans le printemps et l'été. Des conséquences sur la végétation et les habitats naturels sont à prévoir ainsi que, en conséquence, les pratiques agricoles qui pourraient évoluer. Bien qu'une baisse de quelques pourcents de la quantité d'eau disponible soit attendue, des incertitudes quant à la significativité de ces tendances persistent et demandent prudence.

La forêt

Les projections liées à la forêt présagent d'une évolution des conditions climatiques qui seront plus favorables à la dryade du Chêne vert ou encore à la sylviculture du Pin sylvestre. Les incertitudes sont fortes concernant l'évolution des forêts : les conditions météo évolueront-elles suffisamment lentement pour que ces successions s'opèrent ? Si non, il est presque impossible d'imaginer l'évolution des peuplements forestiers à l'horizon 2100.

Or, la forêt est un élément important dans la régulation des apports en eau dans le karst mais aussi, elle possède un rôle central dans l'analyse climatique puisqu'elle stocke du carbone en se développant mais produit aussi de la matière organique qui va, par respiration, apporter du CO₂ dans le sol.

La dynamique actuelle de la forêt, si elle se poursuit, devrait donc permettre une progression lente qui va diminuer l'augmentation de la température sous terre, favoriser un apport d'eau même après les épisodes pluvieux et favoriser l'émission de CO₂ par l'activité microbienne du sol.

Les milieux agro-pastoraux

En Ariège, le projet Clim'Agil s'est intéressé à l'atténuation et l'adaptation au changement climatique au profit de l'élevage. Le projet a produit des fiches qui correspondent à différents enjeux analysés pour en retirer une stratégie d'adaptation au changement climatique. Au moment de la rédaction de ce rapport, la Chambre d'Agriculture de l'Ariège travaille à l'élaboration d'un plan d'action.

Ces fiches illustrent une meilleure adaptabilité des races rustiques comme la vache Gasconne ou la blonde d'Aquitaine, déjà bien présentes sur le Plantaurel. Elles mettent en avant l'intérêt du sylvopastoralisme pour un gain des surfaces pastorales tout en favorisant le bien-être animal grâce aux zones ombragées que cette pratique permet. D'autres pratiques telles que la création de bâtiments disposant de bonnes conditions thermiques permettent de limiter les stress thermiques.

Alors que la ressource fourragère sera plus précoce au printemps et plus tardive à l'automne, elle devrait être plus critique en été, ce qui peut être compensé par une pratique du pâturage tournant dynamique ou diversifier les sources de production fourragère comme par la plantation de Mûrier blanc.

Ces observations confortent une vision plutôt optimiste pour le maintien d'une activité pastorale sur le Plantaurel, cette activité disposant de nombreuses pistes d'atténuation et d'adaptation au changements climatiques attendus.

La population de Rhinolophes euryale

Le Rhinolophe euryale est une espèce de chauves-souris cavernicole vivant sur le pourtour méditerranéen. On le trouve le plus souvent de 0 à 800 mètres d'altitude et il s'alimente préférentiellement dans les forêts de feuillus, généralement de Chêne. Considéré en régression à l'échelle européenne, il est actuellement en expansion en région Occitanie où les effectifs dépassent aujourd'hui les plus grands regroupements recensés localement dans la bibliographie. L'histoire de l'espèce en France n'est pas simple. Brosset relève une chute drastique des effectifs lors de la seconde moitié du XXème siècle dont il attribue la cause principale aux activités de baguage. En Ariège, les premiers recensements qui sont intervenus après de large campagnes de baguage ne laissent penser qu'à la présence d'une toute petite population d'à peine quelques centaines d'individus. Depuis, la plupart des colonies ont connus un essor portant la population départementale à environ 3000/4000 individus centrés sur les grottes du Plantaurel, des Petites Pyrénées et des Avant-Monts.

La répartition méditerranéenne, ses affinités forestières et la grande densité de grottes autour des grottes du Mas d'Azil, de Mérigon, d'Unjat et de Tourtouse nous donnent espoir que les habitats nécessaires à l'espèce pourraient lui permettre de prospérer malgré les évolutions climatiques. Il est même possible que la zone favorable à l'espèce s'élargisse à la faveur des cavités et des vallées de plus haute altitude. Alors que le projet CANOPEE semble envisager une dégradation des conditions pour le Chêne pédonculé sur la zone d'étude, l'amélioration des conditions climatiques pour le Chêne vert devrait permettre une évolution qui pourrait convenir au Rhinolophe euryale.

Aussi, les chiroptérologues de la région Occitanie recensent de plus en plus de colonies installées en bâti. Ces habitats, qui ont une inertie thermique moins importante que les grottes, deviennent peut-être de plus en plus intéressants pour cette espèce thermophile. Cette capacité d'adaptation va probablement permettre à cette espèce de prospérer et de (re)coloniser certains territoires via des corridors dépourvus de milieux karstiques. Mais si les populations sont mobiles et, donc, adaptables, les grottes considérées et leurs périmètres de protection sont peu évolutifs. Les cavités sont donc peu adaptables.

D'autres paramètres physiologiques et comportementaux peuvent aussi intervenir, tel que le rôle de l'hibernation pour l'état de santé des individus. L'augmentation de la température pourrait éventuellement raccourcir la durée d'hibernation et entraîner des conséquences positives ou négatives sur l'état de santé des populations. L'augmentation de la température aura, en revanche, un effet positif sur la survie des juvéniles qui pourraient naître plus tôt et profiter d'une période plus longue avant leur premier hiver pour s'alimenter et ainsi avoir de meilleures réserves pour l'hibernation.

Cette vision prospective ne prend pas en compte l'évolution des paysages et autres activités qui pourraient, à l'inverse, freiner voire inverser cette dynamique en intervenant sur des paramètres clés de la démographie telle que la ressource alimentaire par exemple. L'évolution des pratiques agricoles pourrait avoir un effet sur les zones d'alimentation : une augmentation de la superficie de terres agricoles (si elle est accompagnée de plantation de haies) au détriment de la forêt pourrait avoir une incidence faible voire nulle, une pollution des eaux due aux activités agricoles, par exemple, pourrait réduire les zones de chasse favorables à l'espèce.

Enfin, l'évolution de la présence humaine sous terre pourrait aussi avoir un effet sur les populations. Aujourd'hui, la disponibilité en gîtes et la dynamique de populations nous laisse envisager une relativement bonne adaptabilité de l'espèce. Sa résistance aux concentrations de dioxyde de carbone, qui devraient augmenter dans les grottes, est encore inconnue mais plusieurs travaux laissent supposer une meilleure tolérance à des concentrations fortes par les chauves-souris que par les humains. Ceci pourrait donc

favoriser des cavités non dérangées en été pendant la reproduction. Cela dit, le très faible nombre de sites d'hibernation, s'ils restent peu nombreux, devrait faire l'objet d'une attention particulière sur ce point.

Tableau 5 : Sensibilité, capacité d'adaptation et vulnérabilité des cavités en tant que site d'accueil de populations de chiroptères

Enjeux/ ObjetsA 4:17	Objectif à long terme	Facteur d'influence	Paramètre climatique / Exposition RCP 8.5 à 2100	Sensibilité	Capacité d'adaptation	Vulnérabilité		
Lieux d'accueil de populations de chiroptères	Maintenir ou améliorer l'état de conservation de la population de Rhinolophe euryale	Conditions microclimatiques des gîtes	La température et les taux de CO ₂ des cavités augmentent en moyenne et s'assèchent. Les conditions d'accueil changent.	Les chiroptères recherchent des galeries accessibles où la température est stable, chaude en été et stable en hiver entre 12 et 14°C. Les juvéniles sont sensibles à la météo, des pluies soutenues pouvant réduire l'alimentation de la mère et baisser la température du gîte. Première année des individus est la période critique. Hibernation plus courte.	Très sensible	Peuvent changer de gîte. Vont gîter plus loin dans le réseau (+ de déplacements - énergie repro). Diminution de la durée d'hibernation Les naissances peuvent avoir lieu plus tôt en saison, maximisant la durée d'alimentation des juvéniles lors de leur première année.	Moyenne	Forte
		Pastoralisme	Les paysages et les pratiques évoluent peu depuis le néolithique. Le contexte vallonné et karstique ne facilite pas l'installation de pratiques agricoles intensives.	Le Rhinolophe euryale peut présenter une sensibilité marquée aux évolutions du pastoralisme dans un contexte de changement climatique. Cette espèce forestière peut souffrir de la progression du pastoralisme sur la forêt mais peut aussi souffrir de l'intensification de pratiques agricoles et des conséquences sur la qualité de l'eau ou de l'abondance de proies. L'élévation des températures et des stress hydriques ira en faveur d'une évolution du modèle bovin vers un modèle ovin/caprin. Il est aussi possible que le pastoralisme décroisse en faveur des cultures de céréales ou du maraichage.	Moyennement sensible	Peut s'accommoder d'une régression de la forêt par la présence de haies. Peuvent souffrir d'une intensification de l'agriculture (Wickramasinghe et. Al, 2003)	Moyenne	Moyenne
		Sylviculture	La forêt progresse en Ariège. Les conditions deviennent plus favorables aux séries de végétation à affinités méditerranéennes.	Le Rhinolophe euryale est intimement lié aux séries du Chêne vert et du Chêne pubescent (Tuneu-Coral, 2020). Il s'agit d'une des espèces les plus thermophiles d'Europe. Les séries de végétation s'expliquant en partie liée à la température et aux précipitations, l'évolution de ces paramètres peut entraîner une évolution de la composition des communautés et dryades. La hausse des températures et l'augmentation des stress hydriques pourraient favoriser les séries de végétation du chêne pubescent et du Chêne vert en défaveur de la dryade du Hêtre. Le changement climatique peut aussi induire un changement des pratiques sylvicoles locales en faveur de la plantation de résineux.	Sensible	Les déplacements entre les gîtes et les zones de chasse sont relativement faibles. Peuvent exploiter de plus grandes surface d'habitats favorables à la chasse Utilisent les haies pour chasser dans des climats plus chauds. Sont très spécialistes des forêts de feuillus et des haies ainsi que de leurs proies : lépidoptères	Bonne	Faible
		Spéléologie et tourisme	Grotte destination touristique pour l'Ariège. Engouement pour la découverte "sauvage" des cavités en contexte, accru en contexte de canicule.	La pratique de la spéléologie est une source potentielle de dérangement pour les colonies. En période de parturition, la fréquentation humaine des cavités peut provoquer l'affaiblissement des mères, l'avortement ou la chute (et donc la mort) des petits. En hibernation, le dérangement occasionné par le bruit, la lumière ou encore l'augmentation de température due aux corps humains des salles utilisées par les chauves-souris peut provoquer des réveils et donc de la consommation des ressources nécessaires à l'hibernation. La consommation de ces ressources peut provoquer un affaiblissement voire la mort des individus. Les faibles taux de reproduction se traduisent par des impacts forts sur la démographie d'une faible productivité. En cas d'augmentation des températures, la pratique de la spéléologie (en club ou encadrée) pourrait devenir plus attractive particulièrement en été mais pourrait être limitée par l'augmentation des concentrations de CO ₂ dans les grottes.	Très sensible	Nombre de jeunes par femelle sur une saison de reproduction est limité à 1. Peuvent se déplacer vers des gîtes ou des parties des réseaux souterrains plus tranquilles (moins accessibles ou inconnus) et favorables (conditions microclimatiques). Disponibilité en gîtes de report.	Moyenne	Forte

Les invertébrés cavernicoles

La spécialisation des invertébrés cavernicoles à la vie souterraine a conduit à la sélection ainsi qu'à la disparition de certains traits. Par exemple, les membres sont plus allongés, en particulier les organes sensoriels. Les organes de la vue sont réduits voire absents. Il est possible aussi que certains mécanismes de régulation thermique aient aussi disparu lors de cette acclimatation à la vie souterraine (Novak et al., 2014).

Cette adaptation à la vie souterraine a pu intervenir lors des grandes phases de spéciation. Pour les *Trechini* et les *Leiodidae*, ces événements sont estimés vers -30 et -10 millions d'années vers la fin du tertiaire et au début de l'ère glaciaire du quaternaire. Certains auteurs suggèrent que ces espèces, d'affinités endogées, auraient, à la faveur de l'extension des glaciers et d'un climat plus froid, trouvé abri plus profond, dans le karst. Alors que certains travaux montrent leur relativement faible sensibilité à des températures élevées (~23°C) permettant la dispersion à travers le milieu souterrain superficiel chez des *Leiodidae*, d'autres études prédisent que le changement climatique pourrait avoir de graves répercussions sur les espèces de reliques glaciaires qui ne peuvent pas, ou peu, thermoréguler.

L'avenir des invertébrés cavernicoles est difficilement prédictible. Il se pourrait que les reliques glaciaires soient les plus impactées alors que les autres espèces pourraient prospérer du fait des larges palettes de conditions microclimatiques du karst, de leur plasticité physiologique ainsi que leurs capacités à pouvoir migrer.

Le patrimoine archéologique et géologique

L'augmentation de la température et des périodes de sécheresse pourraient causer une augmentation moyenne de la température, de la concentration en dioxyde de carbone sous terre et une modification des interactions hydriques avec des déplacements des zones de condensation ou des points de rosée par exemple. Les conséquences peuvent être importantes pour la conservation des surfaces rocheuses qui abritent des peintures, gravures ou des concrétions minérales remarquables. Une conséquence majeure pourrait être l'apparition/accélération de phénomènes de corrosion qui altéreraient les parois et les pigments et ainsi faire reculer les surfaces calcaires jusqu'à la disparition totale des surfaces à conserver.

A l'inverse, certaines cavités ont montré que la complexité des systèmes inhérents à leur fonctionnement (ventilation, circulation de l'eau, etc.) peut aider à compenser une augmentation du CO₂ par une stabilisation du système climatique interne à la cavité. **La conclusion la plus importante est que les conséquences du changement climatique restent incertaines pour ces cavités en l'absence d'études permettant de comprendre leur fonctionnement propre.**

D'autres facteurs peuvent venir accélérer ces phénomènes, tels que la présence de chauves-souris (Bruxelles et al., 2018) ou la présence humaine par l'exploitation touristique par exemple (Sánchez-Moral et al., 1999).

L'influence du couvert forestier est aussi un facteur important à prendre en compte et, lui aussi, peut provoquer des interactions avec d'autres facteurs d'influence rendant trop incertaines des projections pour les sites étudiés. Toutefois, il est à noter que d'une part le couvert forestier peut favoriser un apport d'eau plus régulier pouvant compenser les périodes de sécheresse mais aussi favoriser l'activité microbienne du sol favorisant, elle, la production de CO₂ qui sera acheminé dans la cavité lors de précipitations. A noter que la composition et la gestion des couverts forestiers pourraient participer à une acidification des sols et une

accélération des phénomènes de corrosion/dissolution dans le karst. L'étude des interactions entre l'interface sol/épikarst est nécessaire à une meilleure compréhension des processus en place pour une meilleure appréciation de la balance bénéfice/risque liée à l'évolution de la forêt.

Tableaux 6 : Sensibilité, capacité d'adaptation et vulnérabilité des invertébrés cavernicoles, concrétions remarquables et vestiges archéologiques

Enjeux/ Objets	Objectif à long terme / Objets	Facteur d'influence	Paramètre climatique / Exposition RCP 8.5 à 2100	Sensibilité	Capacité d'adaptation	Vulnérabilité		
Invertébrés cavernicoles, concrétions remarquables et vestiges archéologiques	Maintenir ou améliorer l'état de conservation du karst et des enjeux associés : invertébrés, géologie, archéologie	Conditions microclimatiques des réseaux karstiques	<p>La température et les taux de CO2 des cavités augmentent en moyenne et s'assèchent.</p> <p>Les conditions d'accueil changent et les processus en place évoluent.</p>	<p>Le karst est un milieu dynamique qui résulte de nombreuses interactions physico-chimiques. La température et l'apport en eau sont des facteurs majeurs dans la mise en œuvre de ces processus. L'augmentation de la température va catalyser la mise en place des réactions chimiques et modifier la répartition des espèces dans la grotte. L'augmentation des sécheresses va assécher les réseaux karstiques et augmenter les concentrations de CO2. La concentration du CO2 va, elle, accélérer les processus de dissolution du karst (CO2+H2O+ CaCO3->bicarbonate de calcium, soluble dans l'eau). Le karst va donc évoluer plus rapidement.</p>	Très sensible	<p>Le couvert végétal peut atténuer les stress hydrique et l'augmentation de la température jusqu'à un certain niveau. Les échanges de CO2 sont plus complexes à anticiper.</p> <p>L'étendue des réseaux offre une gamme de microclimats pouvant permettre à la petite faune de se déplacer afin de trouver des conditions de vie idéales.</p> <p>Il existe de nombreuses inconnues quant au bilan carbone de la dissolution du karst. Ces bilans sont probablement sites-dépendants.</p>	Faible	Forte
		Spéléologie et tourisme	<p>Grotte destination touristique pour l'Ariège.</p> <p>Engouement pour la découverte "sauvage" des cavités accru en contexte de canicule.</p>	<p>L'augmentation de la fréquentation va augmenter localement ou ponctuellement la concentration en CO2 et accélérer certains processus physico-chimiques mais aussi augmenter la dangerosité de la pratique en raisons de concentrations fortes en CO2. Cette augmentation pourrait provoquer la diminution du nombre de visiteurs dans les sites archéologiques pour la conservation des vestiges.</p>	Très sensible	<p>Le couvert végétal peut atténuer les stress hydrique et l'augmentation de la température jusqu'à un certain niveau. Les échanges de CO2 sont plus complexes à anticiper.</p> <p>Gestion des de la fréquentation humaine. Fréquentation peut empirer tux de CO2 et T°. La diminution de la fréquentation peut aider à compenser mais complexifie les études/suivis/sensibilisation aux milieux souterrains</p>	Bonne	Moyenne
		Usages en surface	<p>Les paysages et les pratiques évoluent peu depuis le néolithique. Le contexte vallonné et karstique ne facilitent pas l'installation de pratiques agricoles intensives. La forêt progresse en Ariège. Les conditions deviennent plus favorables aux séries de végétation à affinités méditerranéennes. Les épisodes de sécheresse favorisent les incendies.</p>	<p>Les modifications climatiques à venir pourraient faire évoluer les paysages au dessus des grottes. Si l'avenir de la forêt reste incertain, elle pourrait être modifié dans sa composition avec un développement plus aisé du Chêne vert et des espèces de résineux du pourtour méditerranéen. L'élevage bovin pourrait souffrir des pénuries d'eau. Les grandes exploitations pourraient laisser place à de plus petites exploitations apportant une diversification des pratiques agricoles vers une augmentation des surfaces maraichères.</p>	Moyennement sensible	<p>La présence de résineux pourrait apporter de l'acidité dans la grotte.</p> <p>La matière organique issue du développement de la forêt pourrait accroître la production de CO2</p> <p>Le développement de la forêt pourrait apporter de l'eau en période de sécheresse, réduire la température de la grotte.</p> <p>Les modifications agricoles pourraient augmenter les risques de pollution et d'incendies</p>	Moyenne	Moyenne

RECIT PROSPECTIF DES GROTTES DU PLANTAUREL ET DES AVANTS-MONTS ARIEGEOIS SOUS L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

D'importants changements sont attendus d'ici 2050 sur le territoire des Avants-Monts et du Plantaurel en Ariège. Ils seront d'autant plus intenses à l'horizon 2100 si une réelle transition n'est pas opérée au sein des politiques publiques et du mode de vie de chacun : augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, augmentation de la température moyenne, augmentation des stress hydrique en été et diminution des taux d'humidité moyen dans les cavernes. Les conditions microclimatiques vont évoluer dans l'espace du karst et les interactions en place vont se déplacer. Ces changements vont induire des déplacements des espèces qui vont suivre leurs préférences une fois leurs limites de plasticité atteintes au sein du karst et des grottes vont se déplacer vers d'autres grottes ou disparaître.

Bien que la faune semble en capacité à s'adapter (au moins partiellement) progressivement à l'évolution des conditions microclimatiques des cavités, la récurrence d'événements climatiques extrêmes pourrait s'avérer plus impactante à moyen terme. Les événements extrêmes seront, avec plus de certitudes, très impactants pour la patrimoine archéologique pariétal et dans les parties colmatées des cavités en particulier.

Il est possible que les cavités protégées aujourd'hui pour les chauves-souris deviennent des habitats inadéquats à un horizon lointain et que d'autres cavités, aujourd'hui trop froides, deviennent alors des sites importants pour les populations cavernicoles. De bonnes dynamiques de population comme celle observée chez le Rhinolophe euryale ainsi que l'évolution du climat pourraient donner lieu à des observations plus régulières de cette espèce à de plus hautes altitudes avec une augmentation progressive des reproducteurs et des hibernants dans les cavités plus enfoncées dans les vallées pyrénéennes, à condition que l'habitat leur sied (disponibilité des cavités, tranquillité, ressources alimentaires appropriées, ...).

Des espèces moins mobiles tels que les invertébrés cavernicoles auront la possibilité de migrer au sein des massifs karstiques si le déplacement de leur niche écologique n'est pas contraint par des limites climatiques (disponibilité plus en profondeur, plus haute en altitude ou sur des effets de versants des conditions de température, humidité, ressource alimentaire par exemple). Les espèces à répartition plus large, sur différents massifs ou sous-massifs karstiques auront probablement plus de chances de s'adapter à l'inverse d'espèces à la répartition très réduite tel que *Speonomus piochardi*, uniquement connu de la Grotte de la Garosse, voisine du Pouech d'Unjat.

Les vestiges archéologiques continueront à subir les effets du temps. Alors que certains vestiges seront conservés sous des conditions appropriées, d'autres se verront altérer par des modifications importantes des conditions microclimatiques de leur localité. L'assèchement et la température seront probablement plus délétères pour l'art rupestre (peintures, gravures) qui sera altéré par des phénomènes de corrosion ou de karstification peu protecteurs comme il est possible d'observer lorsque les conditions microclimatiques montrent de fortes concentrations en CO₂ en plus d'une instabilité de l'humidité. La reconquête de la forêt sera une opportunité pour la conservation de ses vestiges, pouvant atténuer les effets du changement climatique sur la ressource en eau ou la température.

Les conditions internes et en particulier le CO₂ pourraient contraindre les activités humaines en réduisant les visites à certaines saisons quand il est plus élevé ou en s'équipant de systèmes pour compenser des concentrations inadéquates à la progression souterraine en toute sécurité.

Cependant, l'intégration de l'effet du CO₂ produit par les visiteurs des grottes touristiques voire de plus petites cavités jugées très sensibles par de simples visites spéléologiques, devra être pris en compte à la fois pour la conservation du karst et des vestiges archéologiques qu'il abrite mais aussi pour la santé des visiteurs. Le nombre de visiteurs peut être ajusté en fonction des capacités de résilience de la grotte comme cela est déjà mis en place pour de nombreuses cavités sensibles.

L'agriculture extensive pourrait se poursuivre accompagnée d'un développement de l'agriculture biologique qui ne devrait pas avoir d'effet négatif important sur les écosystèmes. Elle contribuera aussi à un maintien d'espèces de chiroptères cavernicoles liées au bocage tels que les Grands et Petits rhinolophes ou encore au Minioptère de Schreibers et au Petit murin qui affectionnent les lisières et les milieux ouverts. L'attention allouée à la qualité de l'eau devrait permettre de maintenir une bonne qualité de la ressource si les prélèvements pour l'agriculture et l'activité de production énergétique par l'hydraulique restent raisonnés. Cette qualité de l'eau sera nécessaire au maintien des populations de chiroptères ainsi qu'aux invertébrés cavernicoles du karst. L'importance de la ressource en eau donnera de l'importance à la conservation des karsts pour leur rôle de réservoir et de filtration.

La pratique des sports de pleine nature a vocation à se développer en Ariège qui pourra devenir une véritable destination touristique sur ce volet. L'effet de la température incitera probablement à se « réfugier » sous terre lors de fortes chaleurs. Le développement de ces activités en autonomie, en dehors des clubs, sera défavorable pour la transmission de l'éthique nécessaire à la pratique de ces activités dans le respect des espèces, des milieux et du patrimoine en général. La recherche d'activités extrêmes pourra aussi être favorisée par l'essor des réseaux sociaux. En plus de la possibilité que des atteintes soient portées aux enjeux de conservation, des accidents pourraient avoir lieu et devront être évités à l'aide d'outils de communication et d'une large sensibilisation de la part de l'ensemble des acteurs socio-économiques concernés par ces milieux périlleux.

Enfin, la prise en compte de la biodiversité dans les politiques publiques et l'importance du changement climatique dans l'orientation des financements devraient permettre une augmentation des moyens dédiés à la gestion de ces sites exceptionnels et peu connus. La mise en place d'outils de gestion telle qu'une Réserve Naturelle Nationale représentera un réel avantage pour une gestion plus efficace, optimisée de ce réseau de sites. Elle permettra le recrutement de personnels dédiés à la gestion et la surveillance qui pourront développer de nombreux projets de recherche, mettre en place les suivis nécessaires à la compréhension des phénomènes en place et d'y répondre avec des mesures de gestion adaptées. La force de « l'outil Réserve » permettra probablement l'accès à de nouveaux financements, aujourd'hui très réduits et irréguliers.

CONCLUSION

Les karsts pyrénéens et particulièrement en Ariège, abritent un patrimoine aussi exceptionnel que méconnu. La variété des espèces endémiques, les impressionnantes populations d'espèces de chauves-souris menacées, l'importance des vestiges archéologiques archives de notre histoire et la diversité des contextes géologiques sont reconnues mondialement et méritent d'être étudiées et protégées.

Cependant, la complexité d'accès à ces milieux ainsi que des processus qui régissent leur fonctionnement sont telles que de nombreuses questions demandent réponses pour en assurer une gestion raisonnée.

Les impacts attendus du changement climatique sont d'autant plus compliqués à évaluer. Très peu de suivis sont opérés sur les paramètres climatiques clés des milieux souterrains : concentration en dioxyde de carbone, température, humidité, pression atmosphérique... L'absence d'antériorité dans les suivis limite alors l'analyse de la vulnérabilité à l'horizon 2100 à des généralités basées sur de larges tendances. De plus, la complexité liée au contexte de chaque site demande une approche « site-centrée » pour espérer comprendre leur fonctionnement et leur évolution.

Cette analyse présente des changements attendus tels que l'augmentation de la température, la récurrence des stress hydriques ou encore l'élévation des taux de CO₂ dans les réseaux souterrains. Ces évolutions pourront être atténuées ou catalysées par des facteurs d'influence d'origine anthropique telle que les activités de surface (agriculture, sylviculture) ou les activités spéléologiques ou touristiques. Ces changements pourront présenter des opportunités pour certaines espèces comme les chiroptères qui pourraient, d'une part, voir l'intérêt des sites considérés diminué, mais aussi trouver en des habitats aujourd'hui défavorables devenant appropriés grâce à un fort gradient altitudinal et des effets de versants. Mais ces changements peuvent bouleverser le cycle biologique des espèces et modifier suffisamment les habitats pour les rendre défavorables. Cela doit nous inviter à une grande vigilance quant à la gestion et l'anticipation des actions de gestion vis-à-vis du changement climatique.

Comprendre le fonctionnement de ces habitats pour comprendre et tenter d'atténuer les effets du changement climatique semble être une priorité d'action sur ces sites. L'adaptation pourrait être possible dans certains cas, non pas à travers la conservation d'un périmètre figé, mais plutôt au sein d'une approche plus vaste permettant d'accompagner l'évolution des enjeux dans l'espace tout en adaptant les facteurs d'influence d'origine anthropique dans le respect des acteurs du territoire.

Cette approche ne pourra être possible sans un rassemblement des acteurs de la conservation des milieux souterrains, opérant trop souvent de façon cloisonnée dans leur domaine de recherche spécifique, sans un effort considérable de sensibilisation pour une appropriation des enjeux de conservation de ces habitats pour l'ancrage territorial et enfin sans moyens de gestions adaptés aux enjeux. Cette démarche sera d'autant plus nécessaire que l'augmentation des pressions climatiques ou anthropiques directes va demander une meilleure conciliation des enjeux du patrimoine archéologique (en particulier l'art pariétal) avec la conservation des chiroptères souvent possible, parfois complexe.

Le travail présenté dans ce diagnostic permet effleurer la complexité d'exposer sensibilité et vulnérabilité de ces milieux mais, nous l'espérons, propose des axes de travail pour affiner la réflexion nécessaire à la compréhension des impacts du changement climatique sur le karst et les grottes. Il est le fruit de nombreuses heures de documentation mais aurait nécessité la sollicitation d'un plus grand nombre de spécialistes allant de la géologie à la sylviculture en passant par les acteurs politiques. Il nous a permis de mieux savoir ce que nous ne savons pas et, surtout, d'esquisser de premières pistes d'adaptation au changement climatique.

LISTE DES ACRONYMES

ANA-CEN09 : ANA – Conservatoire d’Espaces Naturels d’Ariège

CDS09 : Comité Départemental de Spéléologie de l’Ariège

CNPN : Conseil National de la Protection de la Nature

CO₂ : Dioxyde de Carbone

DDT09 : Direction Départementale des Territoire de l’Ariège

DRAC : Direction Régionale des Affaires Culturelles

DREAL : Direction Régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement

GES : Gaz à Effet de Serre

OPCC : Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique

PNRPA : Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises

RNNSA : Réserve Naturelle Nationale Souterraine d’Ariège

SESTA : Service d’Exploitation de Sites Touristiques d’Ariège

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., & Mulugetta, Y. (2018). Framing and context. In *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 49-92). [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Chapter_1_HR.pdf
- Becam, G., Perrenoud, C., Testu, A., Moigne, A.-M., Garcia-Fermet, T., Mebarek, N., Bigot, J.-Y., Bruxelles, L., Milizia, C., & Vézian, R. (2021). *Le site moustérien de la grotte du Portel-Ouest (Loubens, Ariège). 2ème rapport intermédiaire de fouille programmée triennale 2020-2022* (p. 88). Laboratoire Histoire Naturelle de l'Homme Préhistorique (Coord.).
- Boleat, C., Carre, B., & Penvern, J. (2019). *Liste hiérarchisée des gîtes à chiroptères d'intérêt majeur en Occitanie*. (p. 19). Conservatoire d'Espaces Naturels de Midi-Pyrénées et Groupe Chiroptères Languedoc-Roussillon.
- Boudergue (Coord.), C. (2010). *Etat des lieux des pratiques et recommandations relatives à la qualité sanitaire de l'eau d'abreuvement des animaux d'élevage* (p. 124). Anses.
- <https://www.anses.fr/fr/system/files/ALAN2008sa0162Ra.pdf>
- Bourges, F., Genty, D., Perrier, F., Lartiges, B., Régnier, É., François, A., Leplat, J., Touron, S., Bousta, F., Massault, M., Delmotte, M., Dumoulin, J.-P., Girault, F., Ramonet, M., Chauveau, C., & Rodrigues, P. (2020). Hydrogeological control on carbon dioxide input into the atmosphere of the Chauvet-Pont d'Arc cave. *Science of The Total Environment*, 716, 136844.
- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136844>

- Bruxelles, L., Jarry, M., Bigot, J.-Y., Bon, F., Cailhol, D., Gregory, D., & Pallier, C. (2018). La biocorrosion, un nouveau paramètre à prendre en compte pour interpréter la répartition des œuvres pariétales : L'exemple de la grotte du Mas d'Azil en Ariège. *KARSTOLOGIA*, 68.
- Coleborn, K., Spate, A., Tozer, M., Andersen, M. S., Fairchild, I. J., MacKenzie, B., Treble, P. C., Meehan, S., Baker, A., & Baker, A. (2016). Effects of wildfire on long-term soil CO₂ concentration : Implications for karst processes. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 330. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4874-9>
- Culver, D., Deharveng, L., Pipan, T., & Bedos, A. (2021). An Overview of Subterranean Biodiversity Hotspots. *Diversity*, 13, 487. <https://doi.org/10.3390/d13100487>
- Del Rosal, Y., Muñoz-Fernández, J., Celis-Plá, P., Hernández-Mariné, M., Álvarez-Gómez, F., Merino, S., & Figueroa, F. (2021). Monitoring photosynthetic activity using in vivo chlorophyll a fluorescence in microalgae and cyanobacteria biofilms in the Nerja Cave (Malaga, Spain). *International Journal of Speleology*, 51(1), 29-42. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.51.1.2404>
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du logement d'Occitanie, Syndicat Mixte du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises, Conservatoire d'Espaces Naturels Occitanie, ANA-Conservatoire d'Espaces Naturels Ariège, & Grottes et Archéologies. (2022). *Projet de Réserve Naturelle Nationale Souterraine de l'Ariège. Dossier scientifique.*
- Ecole d'ingénieurs de Purpan. (2022). *Contribution de la télédétection au diagnostic de vulnérabilité des forêts du Parc naturel régional des Pyrénées ariégeoises* (p. 40). Ecole d'ingénieurs de Purpan. https://www.parc-pyrenees-ariegeoises.fr/wp-content/uploads/2022/05/TDTPurpan_03052022.pdf
- Ecosphère, Chirop'Terra, & ANA. (2020). *Etude écologique au sein de la Grotte d'Aldène (Cessero, 34) située dans le site N2000 « Les Causses du Minervois »—Rapport final* (p. 68). Pour le compte de la DREAL Occitanie.
- Ek, C., & Godissart, J. (2013). Karst et CO₂. Le Transfert de CO₂ dans le synclinal carbonifère de Comblain-au-Pont. *Eco Karst*, 92, 1-5.

- Eurostat. (2012). *Les dépenses de protection de l'environnement*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Environmental_protection_expenditure/fr
- Faille, A., & Deharveng, L. (2021). The Coume Ouarnède System, a Hotspot of Subterranean Biodiversity in Pyrenees (France). *Diversity*, 13(9), 419. <https://doi.org/10.3390/d13090419>
- Genty, D., Bourges, F., F, P., Labuhn, I., B, M., Régnier, É., & Stievenard, M. (2017, mai 21). *Long term trends observed in temperature, pCO2 and drip water isotopes from several south-France caves—Natural and anthropogenic causes*.
- Goiti, U., Aihartza, J. R., & Garin, I. (2004). *Diet and prey selection in the Mediterranean horseshoe bat Rhinolophus euryale (Chiroptera, Rhinolophidae) during the pre-breeding season*. 68(4), 397-402. <https://doi.org/10.1515/mamm.2004.039>
- Goiti, U., Garin, I., Almenar, D., Salsamendi, E., & Aihartza, J. (2008). Foraging by Mediterranean Horseshoe Bats (*Rhinolophus euryale*) in Relation to Prey Distribution and Edge Habitat. *Journal of Mammalogy*, 89(2), 493-502. <https://doi.org/10.1644/07-MAMM-A-054R2.1>
- Jaubert, J., Verheyden, S., Genty, D., Soulier, M., Cheng, H., Blamart, D., Burlet, C., Camus, H., Delaby, S., Deldicque, D., Edwards, R. L., Ferrier, C., Lacrampe-Cuyaubère, F., Lévêque, F., Maksud, F., Mora, P., Muth, X., Régnier, É., Rouzaud, J.-N., & Santos, F. (2016). Early Neanderthal constructions deep in Bruniquel Cave in southwestern France. *Nature*, 534(7605), 111-114. <https://doi.org/10.1038/nature18291>
- Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailhes, J., Hilal, M., & Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>
- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, & Ministère de la Transition énergétique. (2021). *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'Etat* (p. 196). Gouvernement français. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Octobre%202021_Rapport%20sur%20l%27impact%20environnemental%20du%20budget%20de%20l%27Etat.pdf

- Novak, T., Nina, Š., Estera, A., Saška, L., Dušan, D., & Franc, J. (2014). Cold tolerance in terrestrial invertebrates inhabiting subterranean habitats. *KIP Articles*.
https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/885
- OPCC-CTP. (2018). *Le changement climatique dans les Pyrénées : Impacts, vulnérabilités et adaptation. Base de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées* (p. 150).
- Ransome, R. D. (1968). The distribution of the Greater horse-shoe bat, *Rhinolophus ferrumequinum*, during hibernation, in relation to environmental factors. *Journal of Zoology*, 154(1), 77-112.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1968.tb05040.x>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications : An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Sánchez-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 (solutional etching) processes induced by visitors. *The Science of the Total Environment*, 243-244, 67-84. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(99\)00348-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00348-4)
- Tuneu-Corral, C., Puig-Montserrat, X., Flaquer, C., Mas, M., Budinski, I., & López-Baucells, A. (2020). Ecological indices in long-term acoustic bat surveys for assessing and monitoring bats' responses to climatic and land-cover changes. *Ecological Indicators*, 110, 105849.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105849>



naturadapt.com

Le projet LIFE Natur'Adapt vise à intégrer les enjeux du changement climatique dans la gestion des espaces naturels protégés européens. Coordonné par Réserves Naturelles de France, il s'appuie sur un processus d'apprentissage collectif sur 5 ans (2018-2023), autour de trois axes :

- L'élaboration d'outils et de méthodes opérationnels à destination des gestionnaires d'espaces naturels, notamment pour élaborer un diagnostic de vulnérabilité au changement climatique et un plan d'adaptation ;
- Le développement et l'animation d'une communauté transdisciplinaire autour des espaces naturels et du changement climatique ;
- L'activation de tous les leviers (institutionnels, financiers, sensibilisation...) nécessaires pour la mise en œuvre concrète de l'adaptation.

Les différents outils et méthodes ont été expérimentés sur six réserves partenaires du projet, puis revus et testés sur 15 autres sites, avant la dernière phase de déploiement aux échelles nationale et européenne.

Coordinateur du projet



Grâce au soutien financier de



Contact : naturadapt@rnfrance.org / 03.80.48.91.00

Partenaires engagés dans le projet



Financeurs du projet



The Natur'Adapt project has received funding from the LIFE Programme of the European Union

LIFE17 CCA/FR/000089 - LIFE #CC #NATURADAPT

Novembre 2022