

Géologie du karst : développement d'un outil méthodologique de diagnostic karstologique à partir des exemples de la bordure du sud du Larzac et des garrigues montpelliéraines

Mots clés :

Réservoir karstique, Altérations profondes, Crypto-altération, Réseaux karstiques, Gestion de données, Géomodèle 3D.

I. CONTEXTE DU PROJET CIFRE

Dans un contexte global de changement climatique et de croissance démographique, la pression sur la ressource en eau s'accroît. Les karsts constituent une ressource stratégique en eau souterraine, en particulier pour les territoires méditerranéens (Bakalowicz, M., 2010 ; Chen, Z. *et al.*, 2017), notamment parce que ces ressources sont plus facilement renouvelables à l'échelle inter saisonnière. L'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques contribue à la gestion durable et à la préservation de la ressource en eau, en quantité et en qualité, au niveau des territoires à forts enjeux.

1.1. Évolution de la discipline

Après une longue phase d'initiation (Renault, P., 1968 ; Nicod, J., 1975), l'étude des karsts, initialement intégratrice, s'est spécialisée entre hydrogéologie (Drogue, C., 1969 ; Mangin, A., 1975 ; Padilla, A. *et al.*, 1994 ; Bakalowicz, M., 1996 ; Marsaud, B., 1997) et géomorphologie (Sweeting, M. M., 1972 ; Delannoy, J.-J., 1997 ; Ford, D., 1998 ; Palmer, A. N., 2001 ; Ford, D. & Williams, P., 2007 ; Palmer, A. N., 2007). Le karst est ainsi défini à la fois comme un aquifère et comme un paysage (Bakalowicz, M., 1996).

Mises à part les études sur les géosystèmes karstiques (Vaudour, J., 1986 ; Delannoy, J.-J., 1997) qui intègrent le temps long, ces approches aboutissent à terme, à considérer le karst comme un système karstique tel que défini par Mangin (1975), c'est-à-dire une unité de drainage, de part sa structure et son fonctionnement actuel, mais en perdant sa dimension temporelle à l'échelle géologique, c'est-à-dire son évolution, ce qui manque pour définir le karst dans son ensemble.

Par ailleurs, les grands concepts de karstologie ont principalement été élaborés dans des régions de montagne avec un fort contrôle structural (Maire, R., 1990 ; Delannoy, J.-J. *et al.*, 2009), puis ont été revisités et enrichis par l'étude des régions de plateau où les héritages géologiques et géomorphologiques se sont télescopés sur plusieurs millions d'années, notamment les couvertures d'altération et la mobilité des formations superficielles ((Simon-Coinçon, R., 1989 ; Quinif, Y., 1999 ; Jaillet, S., 2000 ; Bruxelles, L., 2001b ; Camus, H., 2003 ; Dandurand, G. *et al.*, 2011). Dans ces démarches, les corrélations entre l'évolution des karsts et la géodynamique des bassins sédimentaires a été prise en compte, voire mise en valeur.

Ces travaux fondés sur l'analyse de la formation des karsts en lien avec l'évolution géodynamique, ont permis une meilleure appréhension du fonctionnement hydrogéologique actuel en fonction de l'héritage géologique des réservoirs carbonatés (e.g. (Bruxelles, L., 2001b ; Camus, H., 2003 ; Mocochain, L., 2007 ; Husson, E., 2013) ainsi que la modélisation des processus ou structures géométriques karstiques, avec des objectifs de quantification et de prédiction (Jeannin, P.-Y., 1998 ; Henrion, V., 2011) (Jouves, J. *et al.*, 2017 ; Jouves, J., 2018) (Collon, P. *et al.*, 2017 ; Dal Soglio, L., 2019).

En parallèle, la mise en évidence récente des nouveaux concepts d'altérations profondes au sein du massif carbonaté (« fantômisation ») (Vergari, A. & Quinif, Y., 1997 ; Vergari, A., 1998; Quinif, Y., 1999; Dubois, C. *et al.*, 2014) et du rôle des couvertures d'altérites en surface (Jaillot, S., 2000 ; Bruxelles, L., 2001b ; Camus, H., 2003), auxquels il faut ajouter le fonctionnement karstique hypogène (Audra, P. *et al.*, 2010)), a totalement renouvelé l'analyse de la genèse des karsts et de l'impact des héritages du passé géologique, sur la structuration et le fonctionnement des systèmes karstiques.

Plus récemment, et hors de ces cadres conceptuels innovants de structuration des karsts dans le temps géologique, les méthodes de datation par cosmonucléides (Granger, D. E. *et al.*, 1997) du piégeage de galets de quartz dans les karsts, parfois utilisées dans les précédentes démarches (Mocochain, L., 2007 ; Tassy, A. *et al.*, 2013) ont été utilisées pour déduire des taux d'incision des réseaux et pour proposer des modes alternatifs de dynamiques de karstogénèse (Malcles, O. *et al.*, 2020a ; Malcles, O. *et al.*, 2020b), qui sont encore discutés.

1.2. Insertion du projet de CIFRE dans la démarche R&D de l'entreprise CENOTE

CENOTE, un cabinet d'expertise et de conseil spécialisé dans le karst et les formations superficielles a largement contribué au renouvellement de l'approche des karsts, et a intégré ces concepts innovants dans sa panoplie de savoir-faire. L'entreprise a développé le diagnostic karstologique, basé sur l'analyse de 3 types d'indicateurs, correspondant à 3 étapes successives de la karstogénèse des réservoirs carbonatés et de la formation des systèmes karstiques. Ces indicateurs relèvent i) de la préparation à la structuration des réservoirs karstiques, notamment les altérations profondes et sous-couverture ; ii) l'organisation des drainages et le creusement des réseaux de conduits karstiques ; iii) l'évolution des cavités après l'abandon des conditions hydrogéologiques de leur mise en place, notamment la formation de concrétions et les apports sédimentaires.

Ces trois étapes d'analyse peuvent se résumer par la détermination de :

- l'époque des altérations du réservoir (fantômisation et crypto-altération),
- l'époque de l'organisation du drainage de l'aquifère (structuration des réseaux karstiques), et
- l'époque des grottes où sont préservés les indicateurs morphosédimentaires et géochimiques de ces trois époques de la karstogénèse.

Cette approche fait l'objet de travaux de recherche développement depuis de nombreuses années au sein de CENOTE. Sa reproductibilité et sa robustesse ont été testées sur de nombreux sites et a été mise en œuvre en France et à l'étranger, notamment dans des travaux récents de l'entreprise (en collaboration avec le CEREGE et VEOLIA (Jouves, J. *et al.*, 2017) (Arfib, B. *et al.*, 2019) ou en collaboration avec le BRGM dans les karst nord-aquitains et du Causse Méjean, permettant la diffusion et la publication des résultats (Husson, E. *et al.*, 2017 ; Husson, E. *et al.*, 2018). Une telle méthodologie permet de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique des systèmes karstiques actuels et d'expliquer l'origine des comportements distincts de plusieurs systèmes karstiques, présents dans une même zone. En conséquence, ces résultats basés sur l'expérience de l'entreprise amènent une importante plus-value en termes d'applications hydrogéologiques.

Pour développer les perspectives acquises par le diagnostic karstologique, la société CENOTE a entamé des recherches sur les paramètres de localisation, d'organisation et de fonctionnement hydrodynamique des circulations karstiques pour la modélisation des réservoirs carbonatés avec pour objectifs de recherche :

- l'identification des discontinuités karstiques interconnectées et leur cartographie semi-automatique au sein du réservoir carbonaté,
- la modélisation de leur répartition et de leur distribution à l'échelle de ce réservoir.

Pour ce faire, CENOTE a élaboré un programme de recherche développement fondé sur trois pôles :

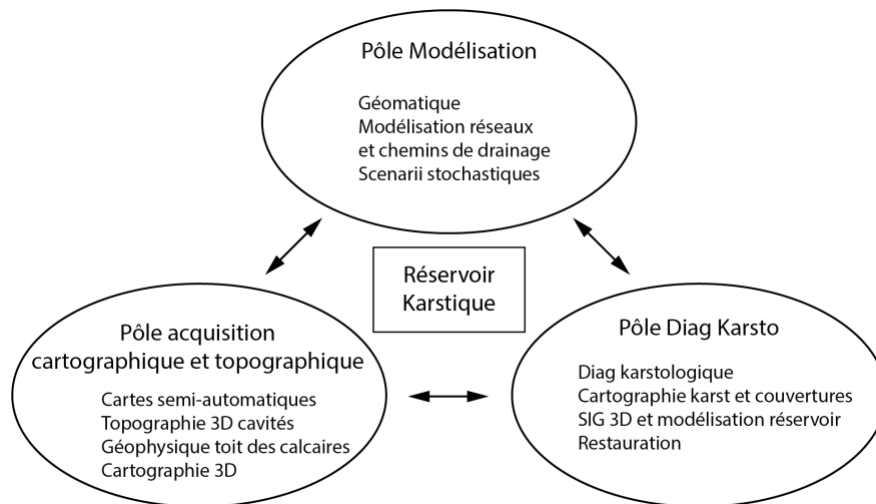


Figure 1 : Pôles techniques représentant la démarche R&D de la Société CENOTE

Le présent projet de CIFRE s'inscrit dans le pôle « Diagnostic Karstologique ». Il est soutenu par le « pôle modélisation réseau » qui est basé sur la prédiction de développement des réseaux karstiques (Jouves, J. *et al.*, 2017; Jouves, J., 2018) et sur le pôle « acquisition 3D » qui formalise les données de cartographie semi-automatique à partir des modèles numériques de terrain, de topographie des réseaux karstiques, notamment à partir de photogrammétrie, et de géophysique destinée à repérer le toit des calcaires (acquisition en externe et en interne).

Dans cette optique, certaines questions soulevées au stade du « diagnostic karstologique » restent néanmoins en suspens et des résultats et méthodes, couramment utilisés par l'entreprise, méritent d'être étayés par une approche scientifique en raison des perspectives de recherche fondamentale qu'ils sous-tendent.

Cette phase de confortement du « diagnostic karstologique » et de développement de la « modélisation des réservoirs karstiques » constitue l'objet de ce projet de recherche (CIFRE), dont le volet technique consiste dans la rationalisation de l'importante base de données accumulées par l'entreprise, en créant un outil numérique de représentation et d'analyse des données,

1.3. ADN du projet CIFRE

Nous développons une approche « réservoir », c'est-à-dire une approche de « géologie du karst » calquée sur l'exploration *oil & gas*. Les discontinuités ou vides qui accueillent le système karstique sont ainsi considérées comme un bassin sédimentaire, structuré et déformé, siège de circulations post-dépôt du substratum carbonaté qui ponctuent l'évolution géodynamique de ce dernier sur le long terme (10^5 à 10^7 Ma). Le fonctionnement hydrogéologique de type karstique actuel exploite l'ensemble des discontinuités qui résultent de cette évolution sur le long-terme. L'analyse de ce que l'on peut ainsi appeler le « réservoir karstique », renseigne sur l'évolution du bassin carbonaté au sein duquel il se développe et inversement. En conséquence, la compréhension de l'évolution géodynamique détermine la structure, et donc, le fonctionnement actuel des systèmes karstiques. La grande complexité du fonctionnement actuel des réservoirs karstiques résulte ainsi de la superposition des phases successives de karstogénèse qui ont créé, modifié ou réactivé des réseaux karstiques au sein d'un même massif carbonaté en fonction de l'évolution géomorphologique des zones de recharge et des zones de restitution des eaux.

Un obstacle à la compréhension et à la modélisation des réservoirs karstiques réside en la difficulté d'intégrer et de corréliser les données très hétérogènes (géomorphologiques, altérologiques, paléoclimatiques, volcanologiques, tectoniques, hydrologiques, sédimentologiques, stratigraphiques, etc...) à prendre en compte et/ou objets de l'analyse karstologique.

La mise en œuvre d'un outil permettant de concentrer, de représenter et d'analyser l'ensemble de ces données dans un environnement numérique cartographique (type SIG) et en 3 dimensions (type géomodeleur 3D), réalisé sur la **plateforme YouWol™** permettra deux avancées majeures :

- Meilleure compréhension de l'architecture et de la séquence de formation des réservoirs karstiques actuels, dans un but académique ;
- Fournir un outil de travail (visualisation, analyse, modélisation) sur une base de données hétérogènes, dans un but technico-commercial pour l'entreprise.

Le projet étudiera des systèmes karstiques de la région bien documentée du sud-Larzac et des garrigues montpelliéraines, où les modèles de karstogénèse sont discutés, alors qu'elle fait l'objet d'un renouveau d'intérêt de la part des collectivités locales, dans un but d'exploration prospective et de la gestion durable de la ressource en eau.

Le projet développera une recherche en karstologie en parallèle aux études appliquées menées par l'entreprise, avec publication des résultats sous forme d'articles scientifiques et création d'un outil de diagnostic karstologique pour l'exploration et la gestion des réservoirs karstiques.

II. OBJECTIFS

2.1. Objectif scientifique du projet de CIFRE

L'objectif scientifique général est la compréhension de la formation, du développement et du fonctionnement actuels des parties d'un réservoir carbonaté affectées par la karstification, notamment parce cette karstification modifie de façon majeure les propriétés de ce réservoir et les conditions de circulation des fluides en son sein. Ces zones affectées par la karstification constituent un réservoir dit « karstique ». L'analyse et la détermination de cette « pathologie par karstification » des réservoirs carbonatés est élaborée par intégration des systèmes karstiques successifs (amont-aval, géodynamique long terme), et les incidences sur les propriétés réservoir des massifs karstifiés, et ce, dans l'optique de la détermination des paramètres significatifs à prendre en compte pour alimenter le modèle 3D.

On abordera plus spécifiquement trois points :

- La préparation du maillage de discontinuités karstiques par altération profondes et de sub-surface,
- La connexion hydraulique des réseaux de drainage entre zone de recharge et zone de restitution, c'est-à-dire le fonctionnement hydrogéologique,
- L'enregistrement des indicateurs morphosédimentaires de ces dynamiques karstiques, notamment après l'abandon du fonctionnement hydrogéologique des réseaux karstiques, c'est-à-dire dans les grottes.

2.1.1. La préparation du maillage de discontinuités karstiques par les altérations profondes et la crypto-altération

Temps du processus : époque des altérations en millions d'années (100 Ma à l'actuel).

Géométries des discontinuités : volumes et surfaces.

2.1.1.1. Rôle des altérations profondes

Dans la zone d'étude, la majeure partie des réserves aquifères se trouve dans la porosité et la fissuration des roches carbonatées, notamment dans les zones d'altération de type « fantômes de roches » (Quinif, Y., 1999) ou « brèches de tassement » (Loucks, R. G., 1999) et « brèches d'altération » (Wyns, R., 2015) développées à la faveur des couloirs de fracturation ou à la base des fronts d'altération sous les couvertures.

La fantômisantion correspond à une altération isovolumique des carbonates par diffusion par exploitation du réseau de fractures pré-existant. Ce processus de karstification (Quinif, Y., 1999) requiert le temps long, plusieurs millions d'années, et une grande stabilité géodynamique. La structure et la texture de la roche est conservée en place, alors que la dissolution entraîne une perte de matière aboutissant à une porosité très importante pouvant atteindre 65 à 75 % (Vergari, A. & Quinif, Y., 1997; Vergari, A., 1998 ; Quinif, Y. & Bruxelles, L., 2011; Dubois, C. *et al.*, 2014). L'énergie chimique à l'origine de ces processus

d'altération profonde provient d'une évolution sous couverture (e.g. (Wyns, R. *et al.*, 2015), l'altération supergène de cette dernière se diffusant dans la zone saturée du substratum carbonaté (Quinif, Y., 1999; Bruxelles, L. & Camus, H., 2010 ; Quinif, Y. & Bruxelles, L., 2011 ; Camus, H., 2017a; b ; 2018; Camus, H., 2019). Cette altération se propage ainsi à partir de la surface sur plusieurs dizaines, voire centaines de mètres, mais serait aussi en relation avec des circulations ou de sources d'énergie chimique profondes sous le contrôle des circulations captives sous la ou les couvertures du réservoir carbonaté (Bruxelles, L. & Camus, H., 2013 ; Husson, E. *et al.*, 2018 ; Camus, H., 2019).

En périphérie de ces zones autorisant le processus de fantômisiation à l'échelle du bassin sédimentaire, ou en cas de déstabilisation géologique modérée ou de faible variation du niveau de base, des circulations deviennent possibles dans le réservoir par libération de volume et apparition d'une perméabilité en grand, notamment par tassement des zones d'altérations fantômisiées (Quinif, Y., 2018) et effondrement sur place sous forme de couloirs de brèches (Camus, H., 2003; Camus, H., 2019). Plus ces circulations augmentent, plus elle révèlent le contrôle structural sur la perméabilité en grand : fracturation tectonique dans les zones d'endommagement (e.g. (Mayolle, S. *et al.*, 2019) ou jointing par déconfinement lors de phase de dénudation, comme pour substratum des bauxites du bas-Languedoc (Marchand, E., 2019).

Il faut des modifications importantes des conditions aux limites du réservoir pour entraîner une interconnexion de ce maillage d'altérations profondes et pour entraîner l'organisation de circulations caractérisant un aquifère karstique et la formation de réseaux de conduits, c'est-à-dire un système karstique. En conséquence, la distribution spatiale de ces zones d'altération peut être associée à la déformation régionale, voire calée sur la chronologie des grandes phases tectonique et/ou eustatiques scandant l'histoire géologique du bassin sédimentaire dans le cas des grands plateaux karstiques ou les massifs calcaires plus ou moins perchés et isolés, dans le cas des karsts de montagne.

Il sera donc possible de caractériser ces zones d'altération, notamment les couloirs de brèches, et de les cartographier grâce à l'analyse des orientations préférentielles, des distributions par rapport aux niveaux litho-stratigraphiques ou aux failles régionales, ainsi que des réseaux hydrographiques et leur situation géomorphologique.

Cette caractérisation déjà proposée pour la fantômisiation dans les zones tabulaires à l'ouest et au nord des Grands Causses {Bruxelles, 2001 #2128 ; Bruxelles, 2010 #4037; Bruxelles, 2013 #4063 ; Husson, 2018 #3991 ; Camus, 2019 #3990}, pourra être recherchée et vérifiée dans des zones déformées ou aux abords des zones d'endommagement des failles majeures (e.g. le long Faille des Cévennes, sur le chevauchement de Montpellier).

2.1.1.2. Rôle des (paléo-) couvertures des massifs carbonatés soumis à karstification.

La présence de couverture modifie les modes de recharge du karst et contrôle le modelé karstique. Les dynamiques de leur formation, de leur préservation ou bien de leur érosion (érosion, soutirage, décapage...) contraignent donc fortement les modalités d'infiltration et donc l'alimentation et la structuration hydrogéologique des aquifères karstiques (Bruxelles, L., 2001a; Bruxelles, L. & Camus, H., 2010). Cette cinématique du démantèlement de la couverture impacte ainsi directement la chronologie et l'architecture des réseaux au sein du système karstique (Jaillet, S., 2000).

Un des objectifs spécifiques consistera à identifier, caractériser et cartographier les couvertures (grâce aux marqueurs des formations résiduelles), qui se sont succédées et qui ont été plus ou moins déblayées. On cartographiera notamment les paléo-surfaces des bauxites (Chanvry, E. *et al.*, 2020), les surfaces de transgressions du Crétacé supérieur et du Paléocène (Husson, E. *et al.*, 2012), les altérites du Paléogène (Simon-Coinçon, R. *et al.*, 1997), les dépôts alluviaux du Miocène inférieur issus des Cévennes (Séranne, M. *et al.*, 2002), les argiles à chaille issues de l'altération de plusieurs niveaux de calcaire siliceux du Jurassique (Bruxelles, L., 2001a). L'analyse des formations résiduelles sera couplée à l'analyse géomorphologique des paléo-surfaces, souvent des surfaces d'aplanissement, sur lesquelles elles sont (partiellement) préservées. Les traceurs lithologiques et minéralogiques des formations résiduelles indiquent leur origine (altération in-situ ou détritiques allochtones) (Wyns, R. *et al.*, 2003) alors que leur relation stratigraphique et structurale avec le contexte géologique précise leur âge (Camus, H., 2001).

2.1.2. L'organisation du drainage et paléo-hydrogéologie

Temps du processus : époque du creusement des réseaux en centaines de milliers d'années.

Géométrie : réseaux de conduits, niveaux de grottes, chemin de drainage.

La géométrie des réseaux dépend de plusieurs contraintes :

- Contrôle structural : dynamiques tectoniques (surrection, subsidence, compression, distension), failles drainantes vs failles barrières, rôle de la fracturation lors de l'ouverture des fissures utilisées par la corrosion sur roche nue, maillage de la fracturation pour le creusement des réseaux par corrosion sur roche nue vs déboussages des zones d'altérations révélant le maillage de fractures.
- Contrôle géomorphologique : variations du Niveau de Base (creusement des vallées, eustatisme, surrection tectonique), ouverture/fermeture de fenêtres hydrogéologiques (érosion régressive, déchaussement des massifs, dénudation des couvertures, dynamiques gravifiques, étagement per descensum enregistrant les dynamiques d'incision, étagement per ascensum enregistrant les dynamiques d'aggradation).
- Contrôle hydrodynamique et des gradients (pression, température, densité (NaCl)) : creusement des conduits sur le niveau de base linéaire ou en boucle avec des profils en longs régularisés, rôle structurant des mises en charge dans la zone épinoyée avec des profils en long irréguliers, grottes tunnels ou percées hydrologiques en écoulement libre sur le profil en long des rivières de surface, systèmes hypogènes sans rapport avec des profils en long.

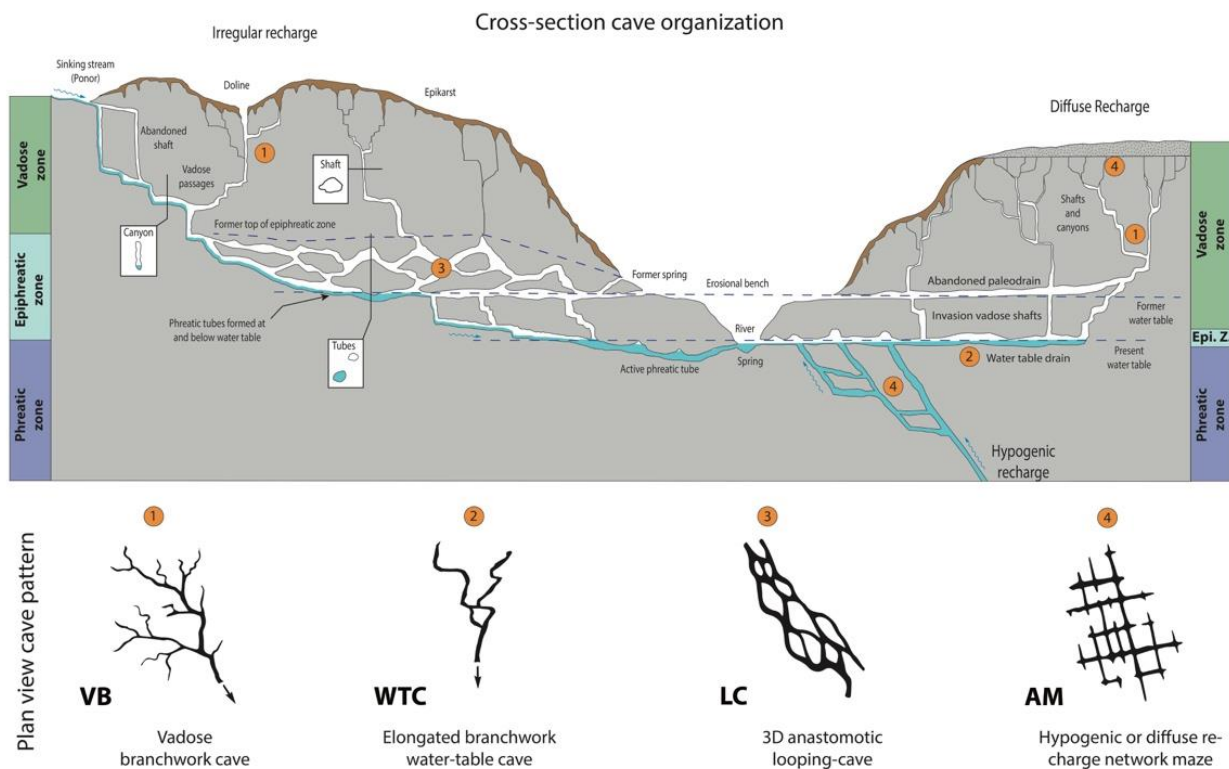


Figure 2 : Coupe théorique transversale de la zonation spatiale des réseaux karstiques et vue en plan des motifs géométriques associés (Jouves, J. *et al.*, 2017)

Cette diversité des contrôles tectoniques, litho-structuraux, géomorphologiques et hydrodynamiques aboutissent à une grande variété de schémas d'organisation des réseaux qui représentent autant d'indicateurs de la réponse karstique à ces contrôles (figure 2).

Dans les grands bassins sédimentaires, comme celui des Grands Causses ou la bordure languedocienne du Bassin du Sud-Est, il est très fréquent que l'organisation des réseaux soit le résultat de plusieurs de ces contrôles ; les types de réseaux exclusivement monogéniques faisant office d'exception comme certains réseaux hypogènes, dans les systèmes volcanokarstiques ou encore spécifiquement littoraux (c'est-à-dire quand les phases d'altération profonde, d'organisation hydrogéologique des réseaux et d'évolution en grotte se confondent en une seule phase, généralement en raison de la vitesse et de l'intensité du processus qui préside à la formation du réseau).

Dans tous les cas, le premier rôle d'organisation des réseaux est assuré par le contrôle litho-structural à l'origine du maillage des failles et joints tectoniques et des joints litho-stratigraphiques autorisant soit la corrosion sur roche nue, soit l'altération des zones mécaniquement plus sensibles à la diffusion (fantômisation et crypto-altération).

A l'échelle du réservoir, le déclencheur de ces processus correspond à la tectonique régionale qui commande les dynamiques géomorphologiques. Le soulèvement ou la subsidence des massifs carbonatés, induit des variations verticales du niveau de base (e.g. (Harmand, D. *et al.*, 2017). Les déplacements le long de failles produit la « compartimentalisation » du réservoir karstique selon que les failles se comportent comme des drains ou des barrières pour les fluides. Dans la zone d'étude, on s'intéressera plus particulièrement aux mouvements différentiels de part et d'autre de la Faille des Cévennes, mais aussi des failles de Saint-Félix-de-l'Héras et d'Alzon.

Un autre déclencheur régional lié à la variation du niveau de base est l'eustatisme sur le temps géologique long, et le climato-eustatisme du Plio-Quaternaire qui engendre quant à lui des vagues d'érosion aréolaire des terrains gélifs et des terrains meubles non calcaires, d'où une phase dominante d'érosion en reculées. L'impact de ces phases de mobilité des niveaux de base peut être abordée sur le terrain d'étude par la quantification de l'intensité de l'érosion et la discussion des taux d'incision mesurés avec les terrasses de l'Hérault et dans le bassin de la Lergue, notamment grâce aux marqueurs constitués par les coulées volcaniques datées (Rabanit, M., 2003) qui obligent à remettre les datations cosmogéniques de l'enfouissement des galets quartz (Malcles, O. *et al.*, 2020a; Malcles, O. *et al.*, 2020b), dans le cadre morphodynamique de leur milieu de dépôt (systèmes de reculées et d'épigénie d'aggradation liées au barrages des coulées volcaniques).

Le secteur d'étude a enregistré aussi des épisodes d'endoréisme majeurs comme le célèbre évènement Messino-Pliocène avec pour conséquence le sur-creusement des canyons non karstiques et leur remplissages par les dépôts des rias pliocènes (Clauzon, G., 1982) (Ambert, P., 1994), et, là où ils sont absents, l'enfoncement des réseaux karstiques qui assurent ainsi le drainage profond (Audra, P. *et al.*, 2004); sur le terrain d'étude, ce modèle devra prendre en compte les épisode de dessiccation du bassin Paléocène (Husson, E. *et al.*, 2012).

L'ensemble de ces observations doit être calé précisément :

- dans le cadre de l'évolution géodynamique régionale déjà abondamment documentée,
- dans le cadre des enregistrements karstiques par les traceurs sédimentaires et les dépôts de concrétions.

2.1.3. Enregistrements karstiques

Temps des processus : époque des grottes en centaines ou dizaines de milliers d'années.

Géométries et chronologie relative : morphodynamique et stratigraphie des remplissages des cavités

Cette phase prend en compte les problématiques de mise en place et de réactivations des réseaux piégeant les témoins de leur fonctionnement hydrosédimentaire, notamment. Il s'agit d'établir des modèles géométriques de dépôts et d'érosion permettant de reconstituer des chronologies relatives. Un soin particulier est à porter sur les enregistrements morphosédimentaires des principales ruptures morphodynamiques dans le karst, par exemple pour distinguer les systèmes autorisant des transits sédimentaires allochtones des systèmes de déboussages des fantômes de roches.

Une fois ces modèles géométriques morphosédimentaire reconstitués et après vérification des traceurs pétrographique et/ou géochimiques permettant de déterminer leur provenance, les datations absolues (déjà acquises : e.g. (Malcles, O. *et al.*, 2020a; Malcles, O. *et al.*, 2020b), pourront être remises dans leur contexte de dépôt et analysées par rapport à leur condition d'occurrence, souvent liées à des remaniement fréquents et complexes.

Il s'agira de déterminer et de caractériser les éléments distinctifs des différentes formations superficielles : galets de quartz corrodés, quartz d'exsudats, schistes des Cévennes, chailles, fragments de croûtes latéritiques (Demangeon, P., 1959; Coulet, E., 1962; Demangeon, P., 1967 ; Cadillon, M., 1970 ; Coulet, E., 1970; Freytet, P., 1971 ; Coulet, E., 1975 ; Cals, D. *et al.*, 1980 ; Bruxelles, L., 2001b ; Camus, H., 2003) seront répertoriés dans les niveaux karstiques, afin de tracer les circulations, et d'établir les chronologies relatives, entre les zones sources et les zones aval de dépôt.

Les résultats seront discutés et confrontés aux datations obtenues sur les marqueurs de l'évolution post formation des conduits : (U-Th sur spéléothèmes, cosmonucléides sur galets de quartz piégés, paléomagnétisme sur remplissages argileux... (Camus, H. *et al.*, 2000 ; Plagnes, V. *et al.*, 2002 ; Stock, G. *et al.*, 2005). Les datations d'enfouissement de galets de quartz dans les réseaux du canyon de la Vis et du Rieutord ont été interprétés comme âge de l'incision (Pliocène-Quaternaire) induisant des taux d'incision de l'ordre de 70 à 90 m/Ma (Malcles, O. *et al.*, 2020a ; Malcles, O. *et al.*, 2020b). De tels résultats rajeunissent significativement la période de morphogenèse, limitée au Plio-Quaternaire, et induiraient une simplification des processus conduisant au fonctionnement actuel. Enfin, ces données chrono-stratigraphiques pourront être comparées et intégrées au contexte géodynamique externe, notamment aux niveaux repères déjà connus (Néogène, Rifting oligocène, Pyrénéen, Paléocène, Crétacé sup., Bauxites) pour les grandes phases de karstification à l'échelle locale et régionale.

2.2. Objectif méthodologique

Afin de répondre aux besoins de la demande en ingénierie géologique et hydrogéologique des régions karstiques, la Société CENOTE développe plusieurs programmes de recherche appliquée sur divers sujets tels que : modalités d'infiltration des massifs karstiques, hydrodynamique des réseaux karstiques, mesures et capteurs, topographie et cartographie semi-automatiques. Le projet principal concerne l'étude des réservoirs karstiques dans leur ensemble, en vue d'élaborer des modèles prédictifs de gestion durable de la ressource en eau.

Comme vu plus haut le projet de thèse CIFRE s'insère dans une démarche R&D de l'entreprise qui repose sur trois pôles :

- pôle modélisation des réseaux karstiques et des chemins de drainage (porté dans l'entreprise par Johan Jouvès)
- pôle acquisitions 3D (MNT, photogrammétrie, tomographie) pour la cartographie de surface, les topographies des cavités et les sondages géophysiques (toit des calcaires) (Gael Cazes, référent dans l'entreprise)
- pôle structuration karstique des réservoirs et restauration des systèmes successifs (Céline Baral, doctorante Cifre pressentie).

Ces trois pôles de recherche correspondent à des applications et des fonctions (métiers) différents au sein de CENOTE.

L'objectif méthodologique principal de l'étude est de créer un cadre d'acquisition et d'intégration des données karstologiques dans un modèle 3D de réservoir karstique de type GeoModeler alimenté par :

- des données d'acquisition de terrain (cartographie des formations et formes karstiques),
- l'intégration de données fournies par les deux pôles modélisation et acquisition 3D en interne (les données de terrain pouvant initialement être à l'origine et/ou au paramétrage des modèles 3D),
- l'intégration des données publiées (cartes géologiques, forages, gravimétrie, sismique passive, datations etc.).

L'objectif technique innovant de l'étude est de développer un outil conceptuel de concentration, de représentation et de corrélation de données sur les réservoirs karstiques, grâce à la plateforme collaborative YouWol™ (<https://www.youwol.com/youwol-platform>) qui permet d'intégrer et de corréler des données de nature très hétérogènes. Classiquement, les SIG intègrent les données de surface (paléosurface, cartes géologiques, imagerie satellitaire, mnt, réseau hydrologique de surface, etc), ou bien projettent sur la surface des données à variable altitudinale. La plateforme, permet d'intégrer les données en profondeur (isobathes, données de forage, plans de failles, réseaux souterrains, etc...) afin de construire un géomodèle 3D des zones analysées. Cet outil constituera à la fois une base de données et un outil d'analyse et de traitement des données.

A terme, ce SIG en 3D deviendra un outil d'exploration, d'exploitation et de modélisation des réservoirs karstiques, pour aborder les problématiques appliquées propres aux bureaux d'études en termes d'évaluation des ressources en eaux karstiques :

Il permettra notamment de :

- Localiser les réserves
- Évaluer les modalités d'infiltration et d'alimentation
- Reconstituer les chemins de drainage

- Évaluer les accès à la ressource.
-

2.3. Zone d'étude

Le terrain d'étude correspond à la partie méridionale des Grands Causses, mais des terrains de comparaison sont prévus. Pour réaliser les objectifs méthodologiques de ce projet de thèse, c'est-à-dire la partie recherche développement, la partie méridionale des Grands Causses présente des phases de karstification qui se sont succédées sur le temps long avec un cadre géologique modérément complexe (e.g. (Séranne, M. *et al.*, 2002)). De plus, l'équipe encadrante possède une bonne expérience de ce secteur où il existe une large base de données. Enfin, il s'agit d'un secteur d'intérêt des collectivités territoriales dans un but appliqué.

La zone d'étude s'articule autour de l'axe du **canyon de la Vis**, des vallées de contact avec les Cévennes (**vallée de l'Arre et haut Hérault**) et des **reculées de la Lergue** (Lodévois).

Le canyon de la Vis est un trait de sabre qui tranche le réservoir en son centre. L'organisation des réseaux se caractérise par des géométries arborescentes et par des développements dans sa partie haute et au-dessus, et dans la partie basse et au-dessous de son talweg. Les flancs du canyon ne semblent pas recouper de niveaux de grottes. Cet étagement particulier des niveaux de réseaux est interprété comme une rupture importante des conditions de drainage et une incision rapide attribuée à la surrection du massif.

La vallée de contact de l'Arre et les Reculées de la Lergue présentent des organisations de réseau très différentes. Cela tient aux conditions litho-structurales en périphérie du réservoir (bordure de bassin), qui présente une remontée des imperméables à l'affleurement. Nous faisons l'hypothèse que l'extension de réseaux à motifs labyrinthiques résulte de la vidange des zones d'altération des couloirs fantômisés au fur et à mesure de l'érosion régressive basale des fonds de reculée, c'est-à-dire sans incision verticale, ou de faible ampleur.

La modélisation de l'extension de ces réseaux et l'analyse de leur étagement permettra de spatialiser la progression différentielle des réseaux au sein du réservoir à partir de zones de restitution des eaux, qui dépendent d'évolution géomorphologique très différentes. Cela permettra aussi de caractériser les zones de réserve plus ou moins abondantes (présence de karst profond ou non) et les moyens d'y avoir accès. Enfin, la configuration générale des réseaux dépendant des modalités d'alimentation de l'aquifère au cours du temps, la connaissance de l'état de surface et de recouvrement des formations superficielles permettra de caractériser la sensibilité de la ressource aux infiltrations de surface dans un schéma intégré au sein du modèle de réservoir, karstique 3D.

Pour tester cette méthodologie, les **garrigues nord-montpelliéraines** présentent des contraintes géologiques plus complexes (géométrie des réservoirs, grands accidents chevauchants, mise en place de bassins et de couvertures sédimentaires sur le réservoir carbonaté), notamment en termes de déformations et de variations du niveau de base. Ce secteur bien documenté servira de terrain de comparaison. Beaucoup plus compartimenté que les Causses, les réservoirs des garrigues seront abordés pour développer les aspects spécifiques de chacune des zones et tester les hypothèses de travail, notamment pour l'évaluation des réserves du karst profond et si possible des karsts sous couverture développés sous les bassins du Tertiaire et Crétacé supérieur. Cette évaluation dépend directement de l'état de karstification du réservoir au moment de son enfouissement sous les bassins et des conditions de connexion et/ou de réactivation des discontinuités karstiques soit par pérennisation des fenêtres hydrogéologiques (zone de recharge/zone de restitution des eaux), soit au contraire par oblitération des zones de restitution et confinement de partie captives de l'aquifère (moyenne vallée de l'Hérault, bassins tertiaires du montpelliérais, bassins de Gigean et bassin de Villeveyrac, prisme plio-quadernaire du littoral).

En fonction de l'avancement de la thèse, les travaux sur cette 3^e zone d'étude pourront être reportés à une date postérieure à la thèse, sans incidence sur la cohérence du projet.

III. ORGANISATION

3.1. Données

La doctorante utilisera la large base de données de l'entreprise et acquerra de nouvelles données de terrain, originales, spécifiques et focalisées dans la zone d'étude. Elle analysera, compilera et homogénéisera les données patrimoniales de CENOTE, sur la zone d'étude Sud-Larzac. Ces données sont actuellement sous forme de fiches de diagnostic ou fiche de projet (localisation, relevés topographiques, stratigraphie, tectonique, éléments de karstologie, éléments d'hydrologie, dessins, photographies, références biblio...).

La doctorante acquerra également des données de terrain, elle réalisera des travaux de :

- cartographie des discontinuités (réseau structural, couloirs de fracturation, et/ou de brèches)
- cartographie des affleurements d'altérites préservées et des formations superficielles constituant les couvertures karstiques ;
- identification des marqueurs pétrographiques et minéralogiques des (paléo-)couvertures d'altérites, sédimentaires ou volcaniques, et traçage des sources sédimentaires des éléments détritiques.

La doctorante procédera à la compilation, validation, homogénéisation et intégration de tous les types de données. L'objectif suivant consistera en la Géomodélisation 3D sur la plateforme YouWol™ <https://www.youwol.com/youwol-platform> pour représenter, analyser et traiter les données,

3.2. Documents élaborés par la doctorante

La création d'un outil SIG en 3D sur la Plateforme collaborative YouWol™ va nécessiter l'édition de plusieurs types de documents, réalisés ou modifiés dans le cadre de la thèse:

- cartographies de surface : cartes géologiques et géomorphologiques actualisées, formations superficielles, carte morphokarstique et de drainage, imagerie satellitaire, limites administratives... etc ; avec géoréférencement et data base pour le SIG 2D et 3D.
- intégration des données en profondeur : isobathes géologiques (imperméables et réservoirs), failles, réseaux karstiques (3D et report 2D), données de forages, sondages géophysiques, cartes du toit des calcaires (pour la phase test des garrigues montpelliéraines) ; avec géoréférencement et data base pour le SIG 2D et 3D.
- coupes des systèmes amont-aval (le long des profils en long) à différentes étapes, coupes structurales actuelles et restauration.
- documents pdf (fiches de diagnostic, levés de coupes, logs, etc.), photos, références bibliographiques, réunis dans la base de données et accessible depuis la plateforme collaborative).

La mise en forme de ces documents nécessitera le traitement de données variées. Les cartographies numériques sont gérées sous Qgis en 2,5 D, mais les données cartographiques et les données spéléométriques (topographie des réseaux karstiques, en partie traitée sous Thérion) sont à regrouper sur une base de données accessible par le géomodeleur.

Le travail de thèse consistera aussi à communiquer ces éléments sous forme de vues numériques et surtout de cartes et de coupes pour :

- fournir de fond de document de travail (carte, minutes, coupes restaurées etc.).
- mesurer des volumes ou des profondeurs pour l'évaluation des réserves.
- réaliser des reconstitution (dynamiques ?) de l'extension des zones karstifiées au sein du réservoir, par exemple pour implanter des cibles de forage.
- fournir un cadre géométrique (géographique) à la modélisation hydrodynamique (modèle pluie-débit) ou, le cas échéant, aux essais de pompage en forage.

L'interaction avec les deux autres pôles de recherche (modélisation des réseaux et acquisition 3D) fera l'objet de validation en interne tout au long de la thèse, mais aussi sur des cas d'étude issus de l'activité commerciale de l'entreprise : notamment des études en cours sur l'exploitation de la ressource en eau dans la partie sud du terrain d'étude (captage et forages d'exploitation du Trou du Drac, proposition de ciblage de la ressource drainée par les Fontanilles).

Dans l'optique de l'application tant que dans celle de la recherche fondamentale, la principale perspective serait à termes de développer un modèle dynamique de circulation des eaux dans le modèle réservoir 3D. Des interactions en termes d'application et de recherche fondamentale sont donc envisagés avec des hydrogéologues en plus du travail interne à CENOTE.

3.3. Répartition des activités

Les activités de la doctorante seront partagées entre l'entreprise et le laboratoire en fonction des tâches suivantes :

Dans l'entreprise CENOTE :

- Acquisition de terrain avec le personnel de l'entreprise,
- Participation aux travaux dans le cadre des prestations commerciales de CENOTE, en lien avec la problématique et sur les sites de la thèse, y compris participation à la rédaction des rapports d'expertise pour les clients de l'entreprise,
- Documentation et compilation des données patrimoniales de l'entreprise pertinentes pour l'étude.

Au Laboratoire Géosciences Montpellier :

- Bibliographie (accès aux bases de données académiques),
- élaboration de cartes de synthèse hydrogéologiques,
- traitement et analyse des échantillons (pétrographie sédimentaire, analyses minéralogique, microscopie optique et MEB...),
- prise en main de la plateforme, échange avec les concepteurs de YouWol™,
- construction de coupes géologiques et structurales ; restauration des coupes aux étapes clés de l'évolution (Messinien, Miocène post-rift, Post-Pyrénéen/pré-rift, Paléocène, Durancien),
- élaboration du modèle géologique et karstologique 3D sous plateforme YouWol™,
- rédaction d'articles scientifiques et du mémoire de thèse.

Les périodes d'activités en entreprise et au laboratoire seront partagées équitablement, sur des plages pluri-hebdomadaires, évolutives et établies en concertation entre les acteurs. Des réunions d'avancement, mensuelles, auront lieu entre les acteurs.

3.4. Calendrier :

| Tâches | Sem-1 | Sem-2 | Sem-3 | Sem-4 | Sem-5 | Sem-6 |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bibliographie | X | | | | | |
| Prise en main de YouWol™ | X | X | | | | |
| Data mining et Data-management | X | X | | | | |
| Cartographie (sud Larzac) | X | X | X | | | |
| Élaboration cartes hydrogéologiques | | | X | X | | |
| Construction de coupes et restauration | | | X | X | | |
| Élaboration modèle 3D sous YouWol™ | | | X | X | X | |
| Test d'application de la partie Garrigues | | | | X | X | |
| Validation de l'outil 3D pour CENOTE | | | | | X | X |
| Synthèse évolution géodynamique | | | | | X | X |
| Rédaction thèse (sur publications) | | | | | | X |

IV. BIBLIOGRAPHIE

- Ambert, P. 1994. L'évolution géomorphologique du Languedoc central depuis le Néogène (Grands Causses méridionaux, Piémont languedocien). BRGM, Orléans 210 p.
- Arfib, B., Jouvès, J. & Baudement, C. 2019. Assessing the safe yield of a karst aquifer by rainfall-discharge modeling. 27th International Karst School. « Classical Karst », Postojna, Slovakia.
- Audra, P., Mocochain, L., Camus, H., Gilli, E., Clauzon, G. & Bigot, J.-Y. 2004. The effect of the Messinian deep-stage on karst development around the Mediterranean Sea. Examples from southern France. *Geodinamica Acta*, 17, 389-400.
- Audra, P., D'antoni-Nobecourt, J.-C. & Bigot, J.-Y. 2010. Hypogenic caves in France. Speleogenesis and morphology of the cave systems. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 181, 327-335.
- Bakalowicz, M. 1996. Les processus de karstification et les différents types de karst associés. *Mémoire de la Société Géologique de France*, 169, 363-371.
- Bakalowicz, M. 2010. Karst et ressources en eau souterraine : un atout pour le développement des pays méditerranéens. *Secheresse*, 21, 1-6.
- Bruxelles, L. 2001a. Reconstitution morphologique du Causse du Larzac : Rôle des formations superficielles dans la morphogénèse karstique. *Karstologia*, 38, 25-40.
- Bruxelles, L. 2001b. Dépôts et altérites des plateaux du Larzac central: Causses de l'Hospitalet et de Campestre (Aveyron, Gard, Hérault) - Evolution morphogénétique, conséquences géologiques et implications pour l'aménagement. *Univ. Aix-Marseille* 1, 245p.
- Bruxelles, L. & Camus, H. 2010. Crypto-altération et karstification dans les Grands Causses. In: *Grottes et karsts de France* (Ed. by P. Audra), *Karstologia Mémoires n°19: Association Française de Karstologie*, 314-315.
- Bruxelles, L. & Camus, H. 2013. Étude hydrogéologique des Avants-Causses du St-Affricain et du Causse Guilhaumard. GEOTER / PNRGC. GTR-PNR-1212-1016.
- Cadillon, M. 1970. Les sols du Larzac. Thèse 3e Cycle, Université de Montpellier, 219pp.
- Cals, D., Prever-Loiri, R. & Rousset, C. 1980. Les Terres Rouges des Grands Causses du Massif Central (France). *Revue de Géographie Physique et Géologie Dynamique*, 22, 343-356.
- Camus, H., Séranne, M. & Quinif, Y. 2000. Activité tectonique récente enregistrée par les spéléothèmes: un contre exemple sur la faille des Cévennes (Sud du Massif Central, Hérault, France). *Riviera 2000 - «Tectonique active et géomorphologie»*, Villefranche sur Mer 18-22 Oct 2000.
- Camus, H. 2001. Evolution des réseaux hydrographiques au contact Cévennes-Grands Causses méridionaux : conséquences sur l'évaluation de la surrection tectonique. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172, 549-562.
- Camus, H. 2003. Vallée et réseaux karstiques de la bordure carbonatée sud-cévenole. Relation avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. *Université Bordeaux* 3, 692p.
- Camus, H. 2017a. Couloirs d'altération karstique (brèches, fantômes de roche) : enregistrement de la structuration karstique des réservoirs par altération des couvertures. *Karst et Bassins Sédimentaires, Alès, AFK - Terinov*, 39-41.
- Camus, H. 2017b. Diagnostic karstologique du Causse Méjean. Rapport PROTEE PRO-2018-01. . In: *Étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean* (Ed. by E. Husson, E. Le Goff & H. Camus), BRGM/RP-68189-FR.; BRGM-PNC.
- Camus, H. 2018. Diagnostic karstologique du Causse Noir. Rapport PROTEE PRO-2019-01. . GEOTER-PNGC.
- Camus, H. 2019. Comprendre les cavités naturelles et leur remplissages par l'approche karstologique. In: *Paysages pour l'Homme - Actes du colloque international en hommage à Paul Ambert* (Ed. by M. Laroche, L. Bruxelles, P. Galant & M. Ambert), Cabrières (France), 45-60.
- Chanvry, E., Marchand, E., Lopez, M., Séranne, M., Le-Sout, G. & Vinches, M. 2020. Tectonic and climate control on allochthonous bauxite deposition. Example from the mid-Cretaceous Villeveyrac basin, southern France. . *Sedimentary Geology*, 407.
- Chen, Z., Auler, A.S., Bakalowicz, M., Drew, D., Griger, F., Hartmann, J., Jiang, G., Moosdorf, N., Richts, A., Stevanovic, Z., Veni, G. & Goldscheider, N. 2017. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology J.*, 25, 771-785.
- Clauzon, G. 1982. Le canyon messinien du Rhône : une preuve décisive du "dessicated deep-basin model" (Hsü, Cita et Ryan, 1973). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 24, 597-610.
- Collon, P., Bernasconi, D., Vuilleumier, C. & Renard, P. 2017. Statistical metrics for the characterization of karst network geometry and topology. *Geomorphology*, 283, 122-142.
- Coulet, E. 1962. Morphologie des Grands Causses. *Bulletin de la Société Languedocienne de Géographie*, XXXIII, 3-62.
- Coulet, E. 1970. Caractères et problèmes du karsts languedocien. *Études et travaux de Méditerranée*, 7, 15-33.
- Coulet, E. 1975. Morphologie des plaines et garrigues du Languedoc méditerranéen. *Univ-Montpellier* 3p.
- Dal Soglio, L. 2019. Hétérogénéité géologique, spéléogénèse et hydrodynamique du karst : du concept à la modélisation numérique. Doctorat, Avignon, 340p.

- Dandurand, G., Deves, G., Maire, R., Ortega, R., Genty, D. & Ghaleb, B. 2011. Morphosedimentary study of a cave deposit at Bois du Clos cave (Charentes, France): Geometric constraints and hydrological dynamics. *Quaternaire*, 22, 285-306.
- Delannoy, J.-J. 1997. Recherches géomorphologiques sur les massifs karstiques du Vercors et de la transversale de la Ronda (Andalousie). Les apports morphogéniques du karst. . Doctorat d'Etat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I., 850 pp.
- Delannoy, J.-J., Gauchon, C., Hohlé, F., Jaillet, S.P., Maire, R., Perrette, Y., Perroux, A.-S., Ployon, E. & Vanara, N. 2009. Karst: from palaeogeographic archives to environmental indicators. *Géomorphologie*, 2/2009, 83-94.
- Demangeon, P. 1959. Contribution à l'étude de la sédimentation détritique dans le Bas-Languedoc Faculté des Sciences de Montpellier.
- Demangeon, P. 1967. Premiers résultats d'une étude minéralogique des remplissages karstiques des Causses au sud du Tarn. *C. R Acad. Sci. Paris, D -É§*, 2721-2724.
- Droge, C. 1969. Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques d'apr_s l'exemple de quelques karsts périméditerranéens. Thèse d'Etat, Université de Montpellier.
- Dubois, C., Quinif, Y., Baele, J.-M., Barriquand, L., Bini, A., Bruxelles, L., Dandurand, G., Havron, C., Kaufmann, O., Lans, B., Maire, R., Martin, J., Rodet, J., Rowberry, M.D., Tognini, P. & Vergari, A. 2014. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Review*, 131, 116-148.
- Ford, D. 1998. Perspective in karst hydrogeology and cavern genesis. *Bulletin d'Hydrogéologie*, 16, 2-29.
- Ford, D. & Williams, P. 2007. Karst hydrogeology and geomorphology, Revised Edition edn. Wiley, 562 p.
- Freytet, P. 1971. Les dépôts continentaux et marins du Crétacé supérieur et des couches de passage à l'Eocène en Languedoc. *Bulletin du BRGM*, 4, 1-54.
- Granger, D.E., Kirchner, J.W. & Finkel, R.C. 1997. Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in cave-deposited alluvium. *Geology*, 25, 107-110.
- Harmand, D., Adamson, K., Rixhon, G., Jaillet, S., Losson, B., Devos, A., Hez, G., Calvet, M. & Audra, P. 2017. Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions. *Quaternary Science Reviews*, 166, 38-56.
- Henrion, V. 2011. Approche pseudo-génétique pour la simulation stochastique de la géométrie 3D de réseaux de fractures et karstiques. Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 115p.
- Husson, E., Séranne, M., Combes, P.-J., Camus, H., Peybernès, B., Fondécave-Wallez, M.-J. & Melinte-Dobrinescu, M. 2012. Marine karstic infillings: witnesses of extreme base level changes and geodynamic consequences (Paleocene of Languedoc south of France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 183, 425-441.
- Husson, E. 2013. Interaction géodynamique/karstification et modélisation géologique 3D des massifs carbonatés : Implication sur la distribution prévisionnelle de la karstification. Exemple des paléokarsts crétacés à néogènes du Languedoc montpelliérain. Doctorat, Université Montpellier 2, 314p.
- Husson, E., Camus, H. & Cabaret, O. 2017. Les karsts de la bordure NE du Bassin Aquitain: une histoire polyphasée à l'origine d'une organisation complexe. *Karstologia*, 69, 9-18.
- Husson, E., Goff, E.L. & Camus, H. 2018 Étude géologique, géomorphologique et karstologique du Causse Méjean. BRGM. BRGM/RP-68189-FR,,187p.
- Jaillet, S. 2000. Un karst couvert de bas-plateau: le Barrois - Structure, fonctionnement, évolution. Doctorat, Bordeaux 3, 780pp.
- Jeannin, P.-Y. 1998. Structure et comportement hydraulique des aquifères karstiques. Doctorat, Université de Neuchâtel, 237p.
- Jouves, J., Viseur, S., Arfib, B., Baudement, C., Camus, H., Collon, P. & Guglielmi, Y. 2017. Speleogenesis, geometry, and topology of caves: A quantitative study of 3D karst conduits. *Geomorphology*, 298, 86-106.
- Jouves, J. 2018. Origine, caractérisation et distribution prédictive des structures karstiques. De la karstologie aux modèles numériques 3D. . Doctorat, Aix-Marseille, 256p.p.
- Loucks, R.G. 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implication. *AAPG Bulletin*, 83, 1795-1834.
- Maire, R. 1990. La haute montagne calcaire. Thèse d'Etat, Université de Nice, 732 pp.
- Malcles, O., Vernant, P., Chéry, J., Camps, P., Cazes, G., Ritz, J.F. & Fink, D. 2020a. Determining the Plio-Quaternary uplift of the southern French Massif Central; a new insight for intraplate orogen dynamics. *Solid Earth*, 11, 241-258.
- Malcles, O., Vernant, P., Chéry, J., Ritz, J.F., Cazes, G. & Fink, D. 2020b. Âges d'enfouissement, fantômes de roches et structuration karstique, cas de la vallée de la Vis (Sud de la France). *Géomorphologie*, 26, 255-264.
- Mangin, A. 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques Thèse d'Etat, Dijonp.
- Marchand, E. 2019. Rôle des interactions tectonique-sédimentation sur l'évolution et la variabilité spatiale d'un gisement de bauxite karstique : exemple du bassin de Villeveyrac (sud de la France). Doctorat, Université de Montpellier - IMT Mines Alès, 303p.
- Marsaud, B. 1997. Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. BRGM, 301 p p.
- Mayolle, S., Soliva, R., Caniven, Y., Wibberley, C., Ballas, G., Milesi, G. & Dominguez, S. 2019. Scaling of fault damage zones in carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, 124, 35-50.
- Mocochain, L. 2007. Les manifestations géodynamiques -externes et internes- de la crise de salinité messinienne sur une plateforme carbonatée péri-méditerranéenne : le karst de la Basse Ardèche (Moyenne vallée du Rhône; France). Doctorat, Aix-Marseille 1p.
- Nicod, J. 1975. Corrosion de type crypto-karstique dans les karsts méditerranéens. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 428, 289-297.

- Padilla, A., A., P.-B. & Mangin, A. 1994. Relative Importance of Baseflow and Quickflow from Hydrographs of Karst Spring. *Groundwater*, 32, 267-277.
- Palmer, A.N. 2001. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1-21.
- Palmer, A.N. 2007. *Cave geology*. Cave Books, Dayton, Ohio, USA p.
- Plagnes, V., Causse, C., Genty, D., Paterne, M. & Blamart, D. 2002. A discontinuous climatic record from 187 to 74 ka from a speleothem of the Clamouse Cave (south of France). *Earth and Planetary Science Letters*, 201, 87-103, doi:110.1016/S0012-1821X(1002)00674-X.
- Quinif, Y. 1999. Fantômisation, crypto-altération et altération sur roche nue - Le triptyque de la karstification. *Karst 99 - European Conference, Grands Causses - Vercors (France), Université de Provence*, 159-164.
- Quinif, Y. & Bruxelles, L. 2011. L'altération de type « fantôme de roche » : processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*, 17.
- Quinif, Y. 2018. Fantômisation et spéléogénèse : implications et questionnement. *Karstologia*, 69.
- Rabanit, M. 2003. Caractérisation de l'érosion Plio-Quaternaire d'un bassin versant de la Marge du Golfe du Lion (Bassin de Lodève)Univ-Montpellier2, 38p.
- Renault, P. 1968. Contribution à l'étude des actions mécaniques dans la spéléogénèse. CNRS, Paris p.
- Séranne, M., Camus, H., Lucazeau, F., Barbarand, J. & Quinif, Y. 2002. Surrection et érosion polyphasées de la bordure cévenole - Un exemple de morphogénèse lente. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 173, 97-112.
- Simon-Coinçon, R. 1989. Le rôle des paléaltérations et des paléformes dans les socles : l'exemple du Rouergue (Massif Central français). ENSMP, Paris 290 p p.
- Simon-Coinçon, R., Thiry, M. & Schmitt, J.-M. 1997. Variety and relationships of weathering features along the early Tertiary palaeosurface in the southwestern French Massif Central and the nearby Aquitaine Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 51-79, doi:10.1016/S0031-0182(1096)00122-00128.
- Stock, G., Granger, D.E., Sasowsky, I.D., Anderson, R.S. & Finkel, R.C. 2005. Comparison of U–Th, paleomagnetism, and cosmogenic burial methods for dating caves: Implications for landscape evolution studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 236.
- Sweeting, M.M. 1972. *Karst landform*. Macmillan Press Ltd, London 362 p.
- Tassy, A., Mocochain, L., Bellier, O., Bruacher, R., Gattacceca, J. & Bourlès, D. 2013. Coupling cosmogenic dating and magnetostratigraphy to constrain the chronological evolution of peri-Mediterranean karsts during the Messinian and the Pliocene; example of Ardeche Valley, southern France. *Geomorphology*, 189, 81-92.
- Vaudour, J. 1986. Introduction à l'étude des géosystèmes karstiques. *Travaux de l'U.A. 903, XVI*, 1-8.
- Vergari, A. & Quinif, Y. 1997. Les paléokarsts du Hainaut (Belgique). *Geodinamica Acta*, 10, 175-187.
- Vergari, A. 1998. Nouveau regard sur la spéléogénèse : le pseudo endokarst du Tournaisis, Hainaut, Belgique. *Karstologia*, 31, 12-18.
- Wyns, R., Quesnel, F., Simon-Coinçon, R., Guillocheau, F. & Lacquement, F. 2003. Major weathering in France related to lithospheric deformation. *Géologie de la France*, 1, 79-87.
- Wyns, R. 2015. Origine de la fracturation des aquifères de socle : quel sont les facteurs qui contrôlent les propriétés de l'horizon fissuré. *Colloque Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles, La-Roche-sur-Yon*.
- Wyns, R., Guillou-Frottier, L., Girard, J.-P., Beauvais, A. & Blanc, P. 2015. Réactions exothermiques dans les profils latéritiques sur granites : conséquences sur les eaux souterraines. *Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles, La Chapelle-Hermier, Vendée, France, Comité Français d'Hydrologie - Association Internationale des Hydrogéologues*.