

Risques – Nouvelle-Aquitaine : Le projet Eaux-SCARS : connaissances du fonctionnement des aquifères carbonatés, en Périgord - Agenais - Quercy

Le projet Eaux-SCARS vise en premier lieu une meilleure gestion des ressources en eau, mais les outils géologiques, géophysiques et hydrogéologiques déployés apportent également des éléments de connaissance en vue d'aider à l'évaluation de l'aléa "mouvements de terrain" d'origine karstique en contexte carbonaté, qui fait l'objet d'un guide publié par le Cerema et le BRGM (2023).

Le projet Eaux-SCARS

Les ressources en eau souterraine des formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé au nord-est du Bassin aquitain (Périgord – Agenais – Quercy) sont stratégiques, car elles permettent de satisfaire l'essentiel des besoins en eau de ces territoires. Du fait de leur

étroite relation avec les milieux superficiels, notamment les cours d'eau, elles soutiennent les écosystèmes et activités associés, en particulier en période d'étiage. Par ailleurs, ces aquifères sont le siège d'une karstification¹ importante qui induit des spécificités de fonctionnement des ressources en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif : forte variabilité temporelle des débits et signatures chimiques, vulnérabilité accrue aux pollutions. Dès lors, dans un contexte de changement climatique, la question de la disponibilité de l'eau et de la gestion de ces nappes à moyen et long termes se pose. Les enjeux actuels et futurs consistent à assurer la pérennité de la ressource en eau pour concilier, autant que possible, l'ensemble des usages tout en assurant le maintien des apports vers les milieux superficiels (cours d'eau, lacs, zones humides, etc.).

La complexité de ces systèmes aquifères et le manque de connaissance de leur fonctionnement hydrogéologique ont encouragé la mise en place d'un programme de recherche pour garantir à terme une gestion équilibrée de la ressource.

Le projet Eaux-SCARS (<https://sigesaqi.brgm.fr/-Projet-Eaux-SCARS-.html>), démarré en 2021 pour une durée de 6 ans bénéficie du soutien financier du BRGM, de l'Europe et la Région Nouvelle-Aquitaine via le Fonds Européen De Développement Régional (FEDER), de l'Agence de l'eau Adour-Garonne et des Conseils départementaux de la Dordogne, du Lot, du Lot-et-Garonne et de la Charente. Il vise à garantir à terme une gestion équilibrée de la ressource en réalisant des investigations approfondies qui alimenteront des outils destinés à optimiser la gestion des nappes sur ces territoires.

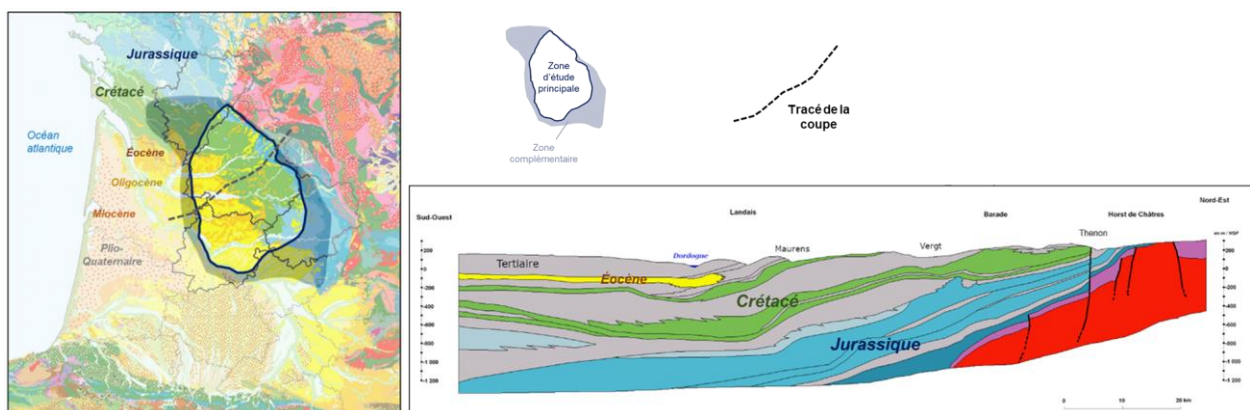


Figure 1 : Périmètre d'étude du projet Eaux-Scars

¹ Karst : Le karst est une structure géomorphologique résultant de l'érosion hydrochimique et hydraulique de toutes roches solubles, principalement de roches carbonatées dont essentiellement des calcaires (Wikipedia). La karstification est un processus de dissolution de la roche calcaire par des eaux météoriques chargées de gaz carbonique et la formation d'un karst ou d'une région karstique

Ainsi, une combinaison d'outils géologiques et géophysiques est mise en œuvre pour revisiter l'agencement vertical et latéral des aquifères entre eux : géométries et variations de faciès des aquifères et des formations argilo-marneuses qui les séparent (épontes), structures majeures.

Le projet revient également sur la genèse des karsts dont la configuration actuelle découle d'une longue évolution polyphasée (ndlr : en plusieurs étapes). Pour comprendre leur fonctionnement actuel, il convient d'identifier les périodes de karstification et leurs modalités de mise en place. En parallèle, des campagnes de mesures et de suivis temporels dans les nappes et eaux de surface sont déployés sur l'ensemble du territoire : piézométrie, débits de cours d'eau, hydrochimie et isotopie. Appuyés par la réinterprétation de pompages d'essai, les suivis visent à mieux cerner le fonctionnement des réservoirs : recharge, écoulement, interactions entre aquifères et échanges nappes/rivières.

L'ensemble de ces investigations doit apporter des données, entre autres, aux modèles hydrodynamiques régionaux, indispensables à la gestion opérationnelle de ces nappes.

Les actions du projet Eaux-SCARS au bénéfice de l'évaluation de l'aléa « karst »

Certaines actions menées dans le cadre du projet Eaux-SCARS peuvent permettre d'identifier des paramètres impliqués dans le déclenchement des affaissements et effondrements de terrain d'origine naturelle, [phénomènes faces auxquels le territoire régional présente une certaine vulnérabilité](#). Ils peuvent ainsi alimenter la méthode multicritère, élaborée par le BRGM et le CEREMA pour évaluer l'aléa des mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté². Cette méthode repose sur l'évaluation de la prédisposition d'un site vis-à-vis d'un type de rupture³ qui consiste à passer en revue, pour chaque processus retenu, les critères concourant à la survenue d'un mouvement de terrain.

Chaque critère est caractérisé et pondéré en fonction de son influence sur le processus étudié.

² « Guide méthodologique, aléas mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté – Evaluation et cartographie ». Cerema, BRGM, 2023.

³ Le guide distingue trois principaux processus susceptibles de se produire en fonction de la typologie du karst : la suffosion/soutirage des matériaux de couverture, le débouillage d'un conduit karstique et la rupture du toit d'une cavité calcaire.

Dans le détail, les critères à analyser pour chacun des processus sont ici regroupés en trois pôles :

- 1) la sensibilité du substratum (roche) carbonaté ;
- 2) le comportement de la couverture (formation meuble de nature et d'épaisseur variables, non karstifiable, surmontant le substratum) (si présente) ;
- 3) le rôle de l'hydrodynamisme.



Figure 2 : Prédisposition aux phénomènes karstiques - critères à analyser, regroupés par « pôle »

Si les travaux du projet Eaux-SCARS trouvent peu d'écho dans le pôle « couverture », certains critères des pôles « substratum carbonaté » et « rôle de l'hydrodynamisme » sont traités au travers de quelques actions. C'est notamment le cas des critères relatifs à la nature du substratum et à sa fracturation, qui sont abordés au travers d'une révision profonde de la géométrie et lithologie des couches grâce, notamment, à l'appui de la **méthode électromagnétique aéroportée (AEM)**.

En parallèle, l'identification et la caractérisation des désordres de surface liés au karst, tels que les dolines, sont approchées au moyen d'un **traitement géomatique de MNT haute-résolution** qui a été mis en œuvre sur l'ensemble du territoire d'étude.

La méthode électromagnétique aéroportée (AEM) pour une révision de la nature, de la géométrie et de la fracturation du substratum

La gestion des ressources en eaux souterraines repose en premier lieu sur une bonne connaissance de la nature et des géométries du sous-sol, qui conditionnent notamment la

disponibilité des ressources et les relations entre les aquifères. Cette caractérisation du sous-sol se base généralement sur des informations géologiques disparates (coupes de forages, cartographie des affleurements), qui sont fonction des données et connaissances acquises sur la géologie locale, souvent insuffisantes en profondeur pour obtenir une vision claire du sous-sol. La géométrie des couches géologiques est par conséquent trop incertaine. Cela se répercute sur la compréhension du fonctionnement des nappes.

Afin de limiter ces incertitudes, l'utilisation de l'électromagnétisme héliporté peut s'avérer opportune. Il s'agit d'une méthode géophysique permettant d'**imager les contrastes de conductivité / résistivité électrique du sous-sol**, qui varient suivant la nature des roches, leurs niveaux d'altération, la présence et la nature de certains fluides, etc.

La mise en œuvre de la méthode par avion ou hélicoptère offre la possibilité de couvrir de manière homogène de vastes territoires. La profondeur d'investigation généralement obtenue est de l'ordre de 300-400 m et peut atteindre 1 km dans des contextes particuliers. La campagne d'acquisition AEM, dans le cadre du projet Eaux-SCARS, a permis d'acquérir environ 1 300 kilomètres de données pour une emprise de plus de 5 600 km².

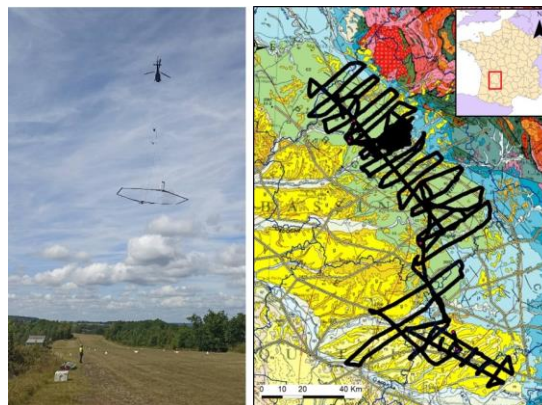


Figure 3 : Levé d'électromagnétisme héliporté à Tocane-Saint-Apre (Dordogne) en 2021 ©O. CABARET - Localisation des profils d'acquisition sur le territoire d'étude (fond : carte géologique au 1/1 000 000)

La méthode électromagnétique aéroportée présente un intérêt avéré, attesté par des études dans des thématiques environnementales variées (Esben et al., 2017), dont **les risques naturels puisqu'elle fournit une aide à la cartographie de l'aléa "mouvement de terrain" et de l'aléa sismique**, et la géotechnique (information sur la nature du sous-sol pour la construction et l'aménagement du territoire).

La méthodologie d'interprétation consiste à comparer, sur chaque coupe, la succession latérale et verticale des faciès et lithologies, identifiables dans les forages présents sur la coupe et affleurements, aux données géophysiques, pour ensuite tracer de manière continue les principales enveloppes lithologiques et/ou stratigraphiques le long des profils. Les grands ensembles sont ainsi identifiés, notamment les principales formations marneuses ou argileuses qui apparaissent comme conductrices, par opposition aux ensembles aquifères (majoritairement carbonatés) résistants.

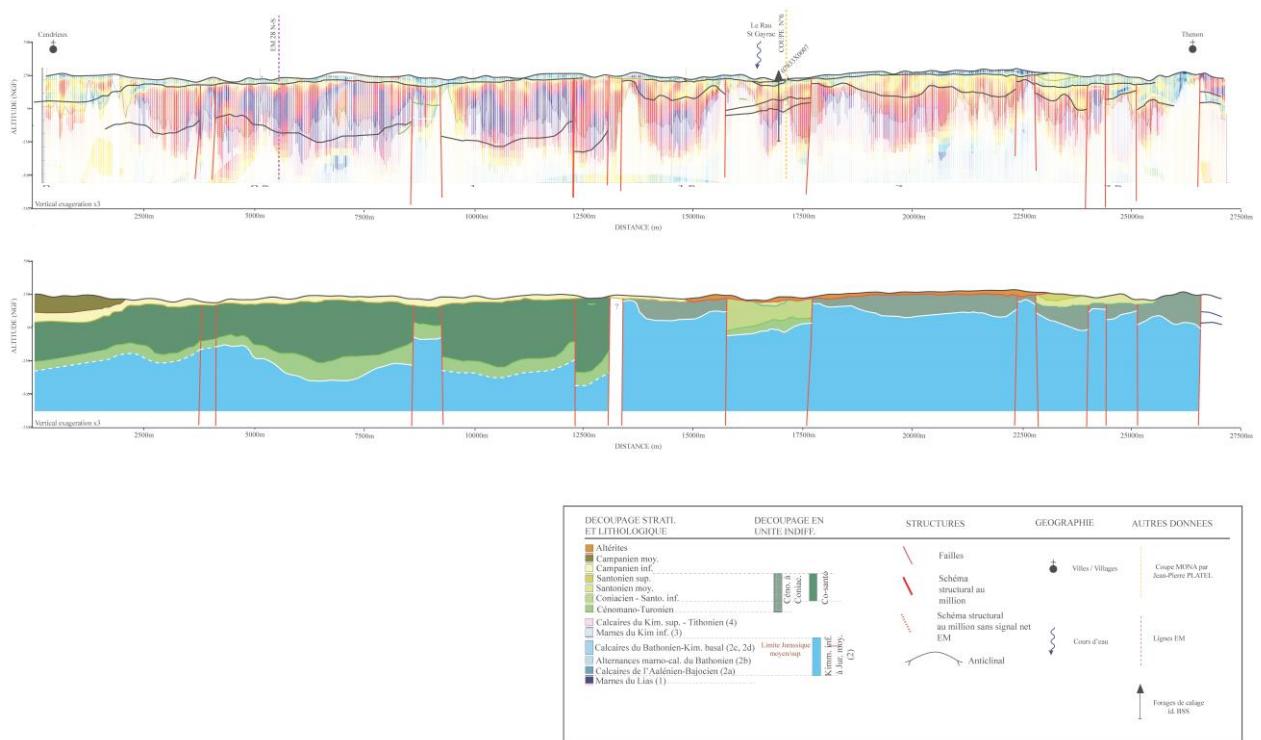


Figure 4 : Profil AEM n°16 du projet Eau-SCARS, obtenu après traitement des données acquises (en haut) et interprétation stratigraphique associée (en bas)

Le constat majeur est que les acquisitions effectuées permettent de revoir la compréhension des agencements à grande échelle des aquifères et formations argileuses qui les séparent. Là où les coupes régionales disponibles dans la littérature, par défaut de données, représentaient des réservoirs superposés tabulaires, de puissances globalement homogènes et continues et peu affectés par la tectonique, à l'exception de quelques structures plissées et de quelques rares accidents majeurs, les données AEM montrent de fortes variations attribuables à une structuration tectonique plus importante qu'envisagée initialement.

De plus, les profils permettent d'imager un certain nombre de structures régionales sous couverture, non identifiées et spatialisées à l'échelle régionale jusqu'alors, faute d'affleurements et de forages fiables.

Enfin, des structures majeures, impliquant des déplacements verticaux localement importants étaient connues et représentées sur la carte géologique à l'échelle du un milliardième. La continuité de ces structures et la géométrie de ces failles dans la couverture sédimentaire jurassique et crétacée n'est souvent pas tracée sur des distances importantes, faute de données (en particulier d'affleurements). Les profils AEM permettent de prolonger le tracé de ces failles majeures à plusieurs endroits et mettent en outre en évidence une structuration bien plus complexe qu'attendue, suggérant une alternance de nombreuses zones effondrées et surélevées qui sont compatibles avec une réactivation de ces failles.

Exploitation de Modèle Numérique de Terrain haute résolution pour la mise en évidence de formes karstiques de surface

Les formes géomorphologiques typiques du karst, telles que les dolines⁴ ou les poljés⁵, peuvent jouer un rôle important dans les écoulements de surface en constituant des points d'infiltration préférentiels de l'eau de pluie directement vers la nappe. Leur identification s'avère ainsi importante pour évaluer à la fois les modalités de recharge des nappes, les orientations des axes de drainage actuels et passés au sein des aquifères, mais aussi évaluer la vulnérabilité des nappes.

Dans le cadre de l'évaluation des risques d'instabilité, certaines de ces formes constituent par ailleurs des désordres de surface témoignant dès lors, de la sensibilité du secteur à la survenue d'instabilités d'origine karstique de type "affaissement" ou "effondrement de terrain". Leur cartographie (localisation, caractéristiques géométriques notamment) revêt de ce fait un caractère stratégique dans la perspective d'une démarche de caractérisation de l'aléa "mouvement de terrain" d'origine karstique.

Leur identification et caractérisation sur le terrain sont toutefois délicates et fastidieuses, car elles sont notamment dépendantes des conditions d'occupation des sols (présence de végétation ou cultures) et chronophages (Figure 5).

La cartographie qui en découle est au final rarement exhaustive.

⁴ dépressions fermées, généralement de forme circulaire ou elliptique, de dimensions petites ou modérées (quelques mètres à 50 m), et généralement moins profondes que larges

⁵ dépressions fermées de grande dimension (quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres), plus longues que larges. Les poljés constituent de vastes plaines dont le fond est généralement occupé par des dépôts insolubles qui constituent des terrains fertiles et cultivés, au milieu de l'aridité habituelle des terrains calcaires



Figure 5 : Exemple de doline en zone boisée susceptible d'être identifiée par exploitation d'un MNT HD

Toutefois, la démocratisation des levés LiDAR⁶ offrant des modèles numériques de terrain haute résolution ouvre la voie pour une détection de ces formes de manière semi-automatique (Figure 6), rapide et sur une surface bien plus importante.

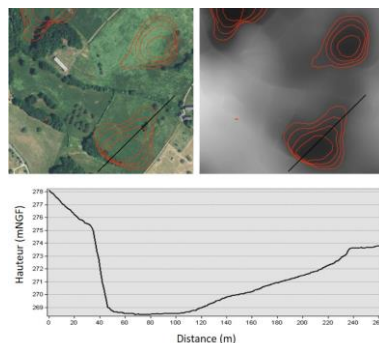


Figure 6 : Exemple de doline détectée grâce à un MNT HD (en vue de haut et vue en coupe)

Sur le territoire d'investigation du projet Eaux-SCARS, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du Référentiel Grande Echelle (RGE) Alti V2[®], mis à disposition gratuitement par l'Institut Géographique National (IGN), issu pour plus de 80 % de l'emprise d'étude de levés LiDAR, a pu être utilisé pour établir un premier inventaire des dolines.

⁶ Le terme LiDAR est un acronyme anglais pour « Light Detection And Ranging » signifiant « détection et estimation de la distance par la lumière ». Le Lidar est une technique de télédétection sous forme de capteur laser qui permet de mesurer la distance à un objet par émission d'ondes lumineuses.

Une méthodologie géomatique a été élaborée à partir du calcul des courbes de niveaux au pas de 1 m, pour identifier les creux. Les courbes de niveaux comprises entre 15 m et 500 m de longueur (ou périmètre), correspondant à des dolines comprises entre 2,20 m et 80 m de rayon, ont été retenues.

Cela semble un bon compromis entre exhaustivité, précision de rendu et capacité de calcul. Ces creux sont ensuite qualifiés afin de distinguer ceux susceptibles d'être de réelles dolines en utilisant l'indice de circularité de Miller, leur proximité à du bâti ou du réseau routier, ces derniers pouvant provoquer des creux ne correspondant pas à des dolines. Au-delà de cette identification, il est possible de caractériser leur pente moyenne et maximale, leur orientation ou leur géologie.

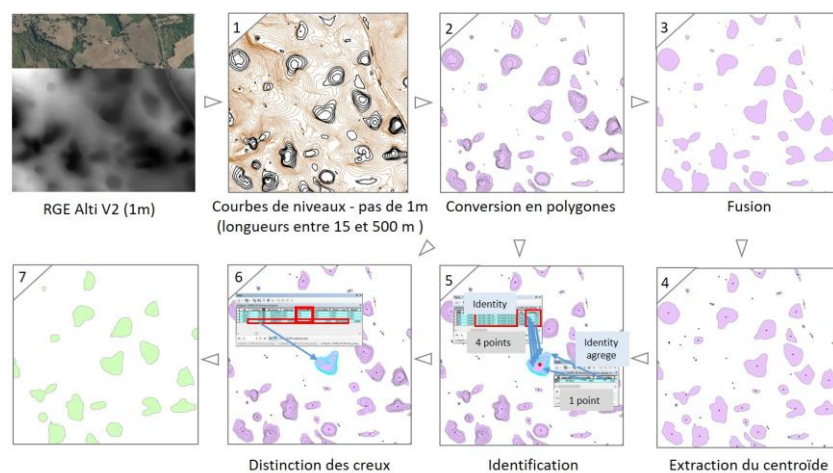


Figure 7 : Méthodologie géomatique : du calcul des isolignes à l'identification des creux

Cette méthode a pu être comparée à d'autres (Cartannaz et al., 2015 ; Noury et al., 2021 ...) et les résultats confrontés à des inventaires et cartographies obtenus de la bibliographie (cartes géologiques et géographiques (Cabaret et al., 2014)) et de travail de terrain (Parc des Causses).

Les résultats obtenus montrent le potentiel de la méthode pour améliorer la connaissance de la géomorphologie karstique d'un territoire et caractériser la vulnérabilité de ses aquifères.

On peut souligner ici la possibilité d'exploiter le RGE Alti V2®, offrant un MNT de haute résolution sur l'ensemble du territoire français et permettant d'appliquer la méthode sur des extensions départementales à moindre coût et sans nécessité de procéder à un levé LiDAR coûteux et localisé.

Plus de 15 000 dolines potentielles ont ainsi été identifiées sur les 22 000 km² du territoire du projet Eaux- SCARS et fournissent aujourd'hui une cartographie d'aide à la décision, exploitée notamment dans le cadre de l'évaluation de l'aléa "affaissement / effondrement de terrain" dans le département de la Dordogne.

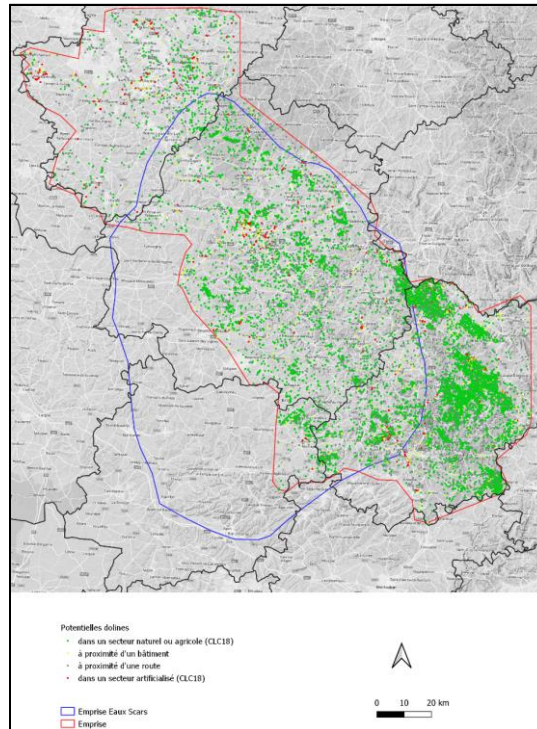


Figure 8 : Répartition spatiale des potentielles dolines dans l'emprise du projet Eaux-SCARS à l'indice de circularité >0,6

Un croisement de cette cartographie avec les formations hydrogéologiques connues de la Base de Données des Limites des Systèmes Aquifères – version 3 (BDLISA-v3), le référentiel hydrogéologique français (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>), révèle des disparités selon la nature des aquifères présents à l’affleurement.

Le développement méthodologique doit être poursuivi et les cartes obtenues précisées pour pouvoir les utiliser dans le futur. Toutefois, l’exploitation de ces données semble prometteuse pour améliorer la localisation des différentes formes géomorphologiques, en obtenir un inventaire à grande échelle et identifier des formes invisibles à l’œil nu sur le terrain.

Les données sont diffusées sur le [SIGES Aquitaine](#), dans la rubrique *Eaux-SCARS* et dans l’espace cartographique <https://sigesaqi.brgm.fr/Donnees-mises-a-disposition-1228.html>, via un formulaire de mise à disposition permettant de garder trace des diffusions effectuées.

La couche SIG est disponible au format WMS :

<https://ws.carmencarto.fr/WMS/120/EauxSCARS> et en shapefile sur demande par mail eaux-scars@brgm.fr.

La fiche de métadonnée est disponible à l’url suivante :

<https://www.mongesource.fr/geosource/1044/fre/catalog.search#/metadata/7e10f40d-d324-44de-b920-56fbbcdb82e6>.

Cette diffusion permet à la communauté scientifique de juger, critiquer et/ou compléter la couche de données afin de consolider la méthodologie et les résultats obtenus.

Conclusion

L'ensemble de ces investigations a pour vocation de venir **alimenter entre autres les modèles numériques hydrogéologiques régionaux** indispensables à la gestion opérationnelle des nappes d'eau souterraine du Bassin nord-aquitain. Dans un premier temps, la géométrie de ces modèles sera mise à jour conformément à celle découlant de l'interprétation des données géologiques et géophysiques (sismiques, AEM, forages...). Puis les résultats obtenus sur les modalités de recharge des aquifères et d'écoulement des nappes dans les réservoirs carbonatés seront retranscrits dans ces modèles.

Par ailleurs, une réflexion devra être engagée pour permettre de faire progresser la caractérisation de la **vulnérabilité de la ressource en eau** : une méthodologie sera élaborée à partir de celles déjà existantes afin de réaliser une cartographie de la vulnérabilité à l'échelle régionale. Cette méthodologie s'appuiera sur des données existantes, qu'elles soient cartographiques (géologie de la surface, pédologie, végétation, formes karstiques, etc.) ou hydrologiques/hydrogéologiques (écoulement dans les réservoirs, données météorologiques, traceurs naturels pouvant informer sur les temps de transfert).

Enfin, les démarches menées dans le cadre du projet Eaux-SCARS apportent un certain nombre de connaissances en lien avec la problématique des instabilités karstiques (affaissements et effondrements de terrain) à laquelle une large partie du territoire néo-aquitain est exposée.