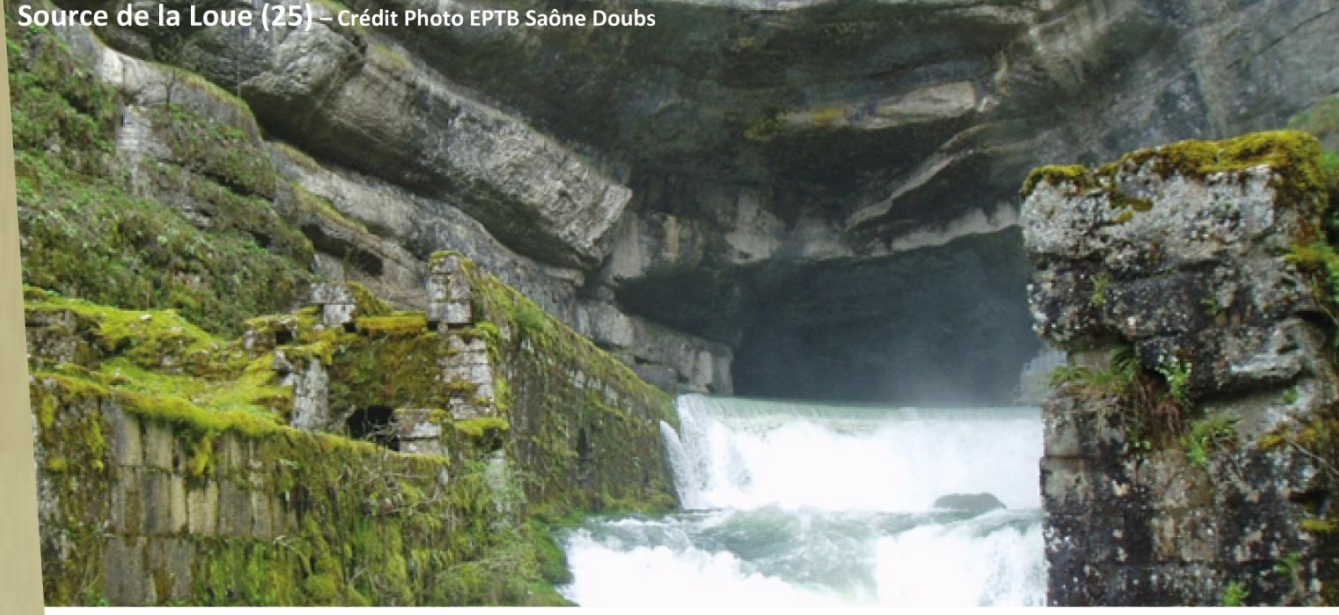


Source de la Loue (25) – Crédit Photo EPTB Saône Doubs



Source de la Bèze (21) – Crédit Photo EPTB Saône Doubs

Délimitation des zones de sauvegarde des ressources stratégiques en contexte karstique

Note méthodologique d'accompagnement

E.P.T.B ÉTABLISSEMENT PUBLIC territorial du bassin saône&doubs

Avec le soutien de :

agence de l'eau RHÔNE MÉDITERRANÉE CORSE établissement public de l'État

RÉGION BOURGOGNE FRANCHE COMTÉ

Doubs le Département

Jura LE DÉPARTEMENT

Pour citer ce document : Fister, V. (2026). Délimitation des zones de sauvegarde des ressources stratégiques en contexte karstique. Note méthodologique d'accompagnement EPTB Saône et Doubs, Pôle Karst, 42 p.

Table des matières

Introduction 1
I. Cadre général et spécificités karstiques 2
A. Contexte et enjeux 2
B. Spécificités hydrogéologiques des aquifères karstiques 4
1. Hétérogénéité structurelle fondamentale 4
2. Dualité de fonctionnement caractéristique 4
3. Variabilité temporelle du fonctionnement 4
II. Validation et caractérisation des ressources stratégiques 5
A. Processus de validation des ressources stratégiques 5
B. Approche conceptuelle et zonage hiérarchisé 7
III. Méthodologies de délimitation des zones de sauvegarde 10
A. Délimitation des zones de production (Zone 1) 10
1. Délimitation et caractérisation des zones de production 10
2. Modalités d'exploitation et choix stratégiques 10
3. Méthodes de modélisation et d'investigation 11
4. Exemple des sources du Dessoubre : la modélisation 3D 16
B. Délimitation des zones d'alimentation (Zone 2) 18
1. Caractérisation des modalités d'infiltration 18
2. Méthodes de cartographie et d'analyse 18
3. Exemple du Parc Sainte-Baume : le diagnostic karstologique 22
C. Évaluation des pressions anthropiques et combinaison multicritère 23
1. Utilisation de l'OCSGE et déclinaisons spécialisées 23
2. Adaptation aux spécificités karstiques 24
3. Méthode de croisement multicritère et hiérarchisation 25
IV. Aide à la décision méthodologique et mise en œuvre opérationnelle 29
A. Diagnostic préalable du contexte 30
B. Orientations méthodologiques par contexte 32
C. Dimensions financières et optimisation 34
D. Validation et contrôle qualité 36
Conclusion 40

Table des illustrations

Figure 1 : État d'avancement des études de ressources stratégiques du bassin Rhône-Méditerranée 2
Figure 2 : Représentation d'un aquifère karstique (modèle jurassien, d'après Bichet et Campy, 2008) 5
Figure 3 : Imbrication des différentes notions spatiales selon l'AERMC 9
Figure 4 : Représentation schématique des deux zonages spécifiques en contexte karstique ... 9
Figure 5 : Systèmes karstiques des sources du Dessoubre selon la modélisation KARSYS (ISSKA, 2024c) 17
Figure 6 : Carte des modalités d'infiltration du plateau de Mazaugues - PNR Sainte-Baume 22
Figure 7 : Les modalités d'infiltration du secteur de la Sainte-Baume (CENOTE, 2020) 23
Figure 8 : Arbre Décisionnel : Méthodologie de Délimitation des Zones de Sauvegarde 28

Tableau 1 : Articulation entre zonage réglementaire (ZSE/ZSNEA) et zonage hydrogéologique (Zone 1/Zone 2) en contexte karstique 7
Tableau 2 : Comparaison des méthodes de délimitation Zone 1 15
Tableau 3 : Comparaison des méthodes de délimitation Zone 2 21
Tableau 4 : Matrice de combinaison infiltration-pression (projet KARSYS Doubs) 25
Tableau 5 : Comparaison des approches territoriales 30

AVANT-PROPOS

Ce présent document a été réalisé dans le cadre des missions du Pôle Karst (EPTB Saône et Doubs).

Son objectif est d'apporter un complément méthodologique spécialisé au guide technique AERMC 2021 "*Identifier et préserver les ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable*". Cette note développe spécifiquement les approches adaptées aux aquifères karstiques, systèmes complexes qui nécessitent des méthodologies particulières en raison de leurs spécificités hydrogéologiques.

Ce document est conçu pour être autoportant tout en s'articulant avec le guide général : les aspects méthodologiques généraux (gouvernance, concertation, financement) pour la délimitation des zones de sauvegarde des ressources stratégiques restent valables et ne sont pas redétaillés, tandis que les adaptations techniques spécifiques aux systèmes karstiques sont développées avec des exemples concrets d'application territoriale.

Les ressources stratégiques se définissent selon les trois critères établis par le guide AERMC : conformité qualitative, importance quantitative et localisation favorable (AERMC, 2021). En contexte karstique, l'évaluation de ces critères nécessite des adaptations méthodologiques spécifiques développées dans cette note. La distinction entre ressources stratégiques actuelles (ZSE) et futures (ZSNEA) s'applique pleinement aux aquifères karstiques, mais leur délimitation nécessite une approche zonale spécifique tenant compte de la dualité de fonctionnement caractéristique de ces systèmes.

GLOSSAIRE

Sigle

AERMC : Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse
AEP : Alimentation en Eau Potable
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EPAGE : Établissement Public d'Aménagement et de Gestion de l'Eau
EPIK : Méthode de cartographie de vulnérabilité des aquifères karstiques (E=Épikarst, P=Protection, I=Infiltration, K=Karst)
EPTB : Établissement Public Territorial de Bassin
GPR : Ground Penetrating Radar. Radar géologique permettant de détecter les structures souterraines peu profondes
ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IDPR : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux
ISSKA : Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie
KARSYS : Méthode et plateforme de modélisation 3D des systèmes karstiques
LIDAR : Light Detection And Ranging
OCSGE : Occupation du Sol à Grande Échelle
PaPRIKa : Méthode de cartographie de vulnérabilité des aquifères karstiques (Paramètres et Pression, Roche, Infiltration, Karst)
PLU : Plan Local d'Urbanisme
RPG : Registre Parcellaire Graphique
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
VLF : Very Low Frequency. Méthode géophysique électromagnétique pour la détection de zones conductrices
ZSE : Zone de Sauvegarde Exploitée. Zone de protection délimitée autour des ressources stratégiques actuellement exploitées pour l'AEP
ZSNEA : Zone de Sauvegarde Non Exploitée Actuellement. Zone de protection délimitée autour des ressources stratégiques destinées à une exploitation future

Termes techniques hydrogéologiques

Aquifère : Formation géologique perméable contenant une nappe d'eau souterraine exploitable
Aven : Puits naturel vertical ou subvertical dans les formations carbonatées, permettant une connexion entre la surface et le réseau souterrain
Bassin d'alimentation : Surface contributive alimentant un système aquifère par infiltration des précipitations et écoulements de surface
Chevauchement : Structure tectonique où une unité géologique est poussée au-dessus d'une autre
Chronique : Série de mesures d'un paramètre (débit, niveau piézométrique) effectuées dans le temps
Conduit karstique : Galerie souterraine de dissolution dans les formations carbonatées, pouvant atteindre plusieurs mètres de diamètre
Doline : Dépression fermée caractéristique du karst, généralement de forme circulaire ou elliptique, résultant de processus de dissolution ou d'effondrement
Drain (karstique) : Conduit souterrain assurant la collecte et le transit des eaux vers les exutoires
Épikarst : Zone superficielle altérée au sommet des formations carbonatées, de forte perméabilité, assurant le stockage temporaire et la redistribution des eaux d'infiltration
Exutoire : Point d'émergence naturel des eaux souterraines (source, résurgence)
Hydrogramme : Représentation graphique de l'évolution temporelle du débit d'un cours d'eau ou d'une source
Impluvium : Surface topographique collectant les eaux de précipitation qui alimentent un système karstique (équivalent du bassin versant en surface)
Infiltration concentrée : Pénétration rapide des eaux de surface vers l'aquifère via des points singuliers (pertes, avens, dolines)
Infiltration diffuse : Pénétration progressive des eaux à travers les sols et la zone non saturée sur l'ensemble d'une surface
Karstification : Processus de dissolution chimique des roches carbonatées créant des réseaux de vides interconnectés
Lapiaz (ou lapié) : Formation rocheuse de surface résultant de la dissolution des calcaires
Masse d'eau : Unité de gestion cohérente des eaux souterraines ou de surface définie par la Directive Cadre sur l'Eau
Masse d'eau à enjeu AEP : Masse d'eau dans lesquelles le SDAGE Rhône Méditerranée demande de caractériser les ressources stratégiques à préserver et leurs zones de sauvegarde
Monoclinale : Structure géologique simple où les couches rocheuses présentent un pendage constant dans une direction
Modélisation 3D : Représentation tridimensionnelle de la géométrie et du fonctionnement d'un système hydrogéologique
Ouvrages structurants : Captage présent sur une ressource stratégique exploitée, d'intérêt majeur pour la desserte en eau potable des populations et dont l'altération poserait des problèmes immédiats pour les populations qui en dépendent
Perte : Point d'infiltration où un cours d'eau de surface s'engouffre dans le sous-sol karstique
Piézométrie : Mesure du niveau de la nappe d'eau souterraine
Système karstique : Ensemble fonctionnel constitué d'un impluvium, d'un aquifère karstique et d'exutoires

Traçage artificiel : Technique consistant à injecter un traceur (fluorescent, salin, isotopique) pour caractériser les connexions hydrauliques et les vitesses de transfert
Zone capacitive : Partie de l'aquifère karstique assurant le stockage dans la porosité de fissures et la matrice rocheuse
Zone noyée : Partie de l'aquifère située en permanence sous le niveau piézométrique, saturée en eau
Zone transmissive : Réseau de conduits karstiques assurant le drainage rapide et le transit des eaux vers les exutoires
Zone vadose : Zone non saturée située au-dessus du niveau piézométrique, où les conduits ne sont pas en charge permanent

RÉSUMÉ DE LA NOTE

Contexte et enjeux

Les aquifères karstiques du bassin Rhône-Méditerranée constituent une ressource stratégique majeure desservant plusieurs millions d'habitants. Malgré l'identification de 127 masses d'eau à fort enjeu AEP depuis 2010, la mise en œuvre des démarches de protection reste hétérogène. Cette note méthodologique propose un référentiel adapté aux spécificités karstiques pour harmoniser les pratiques territoriales.

Messages clefs

1. Les aquifères karstiques nécessitent une approche spécifique. Les méthodes conventionnelles sont inadaptées en raison de l'hétérogénéité structurelle, la dualité de fonctionnement (stockage + drainage rapide), la variabilité temporelle et la vulnérabilité particulière (transferts de plusieurs centaines de mètres/heure).

2. Un zonage adapté en deux composantes :
    - Zone 1 (Production) : portions d'aquifères les plus productives (exutoire, drains, réserves noyées) ;
    - Zone 2 (Alimentation) : impluvium complet des zones 1 incluant les bassins contributifs via perte.

3. Une méthodologie graduée selon la complexité

Complexité	Budget	Méthodes recommandées
Simple	< 50 k€	IDPR/ Carte Karst + modélisation 2D
Modérée	50-150 k€	Cartographie multicritères + traçages ciblés
Complexe	> 200 k€	Diagnostic karstologique + Modélisation 3D + géophysique

4. Trois facteurs déterminants de réussite
    - Robustesse technique proportionnée aux enjeux
    - Acceptabilité sociale par concertation précoce
    - Accompagnement financier et technique

5. Erreurs fréquentes à éviter
    - Sous-estimation de la complexité → délimitations erronées
    - Surinvestissement méthodologique → surcoûts inutiles
    - Absence de validation croisée (notamment par traçages) → incertitudes non maîtrisées

6. Facteurs de succès observés
    - Diagnostic préalable rigoureux (complexité, données, moyens)
    - Approche progressive adaptative
    - Mutualisation territoriale (économies 30-50%)
    - Expertise karstologique dès la conception

Stratégie de déploiement

- Phase 1 : Préparation (3-6 mois) → Compilation données → Évaluation complexité → Dimensionnement → Identification expertise
- Phase 2 : Délimitation des zones de sauvegarde (6-18 mois) → Application méthodologies → Investigations ciblées → Validation croisée → Cartographie finale
- Phase 3 : Opérationnalisation (6-12 mois) → Concertation → Mesures protection → Intégration PLU → Suivi-évaluation

Hiérarchisation finale

La combinaison multicritère permet un zonage opérationnel gradué qui peut également servir de guide pour un aménagement du territoire compatible avec une préservation durable de la ressource :

- Z2_1 : Risque faible (protection naturelle significative)
- Z2_2 : Risque modéré (surveillance, mesures graduées) + sous-zone vigilance (Z2_2b)
- Z2_3 : Risque élevé (protection renforcée, outils réglementaires)

Financement

- Agence de l'Eau RMC : jusqu'à 70%
- LIFE+ : jusqu'à 60% (projets innovants)
- Interreg : jusqu'à 85% (systèmes transfrontaliers)
- D'autres partenaires peuvent également contribuer au financement des études : les Départements, les Parcs Naturels Régionaux (PNR), et les collectivités territoriales dans le cadre de leurs politiques de protection de la ressource en eau

Synthèse

Cette note propose un référentiel méthodologique gradué permettant d'adapter la sophistication technique à la complexité réelle des systèmes et aux moyens disponibles. Le choix d'une méthodologie appropriée, validée par expertise spécialisée, conditionne la qualité, le coût et l'acceptabilité des délimitations. L'harmonisation des pratiques contribue à la sécurisation durable de l'approvisionnement face aux défis climatiques.

Contacts : • Agence de l'Eau RMC • DREAL BFC • Pôle Karst (EPTB Saône-Doubs) • ASCOMADE

Introduction

La protection des ressources en eau souterraine répond à un impératif de sécurisation de l'approvisionnement, dans un contexte de raréfaction et d'intensification des pressions anthropiques. Cette protection contribue également à la non dégradation des rivières et zones humides alimentées par les eaux souterraines, en maintenant la qualité et la quantité des débits de base. Sur le bassin Rhône-Méditerranée, les formations carbonatées représentent une part significative des ressources mobilisées pour l'alimentation en eau potable, avec des systèmes karstiques qui alimentent directement ou indirectement plusieurs millions d'habitants.

Ces aquifères présentent des caractéristiques hydrogéologiques singulières qui les distinguent fondamentalement des autres formations perméables. Leur architecture interne, organisée autour de réseaux de conduits hiérarchisés, génère des modalités d'écoulement et de vulnérabilité qui nécessitent une adaptation des approches conventionnelles de protection. La délimitation de zones de sauvegarde autour de ces ressources stratégiques ne peut s'appuyer sur les méthodologies standard développées pour les milieux poreux ou simplement fissurés.

La notion de zones de sauvegarde, définie par le SDAGE Rhône-Méditerranée, vise à préserver durablement les ressources stratégiques en eau souterraine les plus importantes du bassin par l'application de mesures de protection adaptées aux enjeux identifiés. Cette approche préventive s'articule autour de deux concepts complémentaires : les zones de sauvegarde exploitées (ZSE), qui correspondent aux ressources actuellement mobilisées, et les zones de sauvegarde non exploitées actuellement (ZSNEA), qui constituent les réserves stratégiques pour les besoins futurs.

L'efficacité de ces dispositifs de protection repose sur la qualité de leur délimitation spatiale, qui doit intégrer à la fois la complexité des processus hydrogéologiques en jeu et les contraintes opérationnelles de mise en œuvre territoriale. Pour les systèmes karstiques, cette exigence se traduit par la nécessité de développer des méthodologies spécialisées capables d'appréhender la spécificité de ces milieux tout en produisant des résultats directement utilisables par les acteurs territoriaux.

Cette note technique développe un référentiel méthodologique adapté aux enjeux spécifiques de caractérisation et de délimitation des zones de sauvegarde en contexte karstique. Elle propose une approche graduée qui articule sophistication technique et pragmatisme opérationnel, en s'appuyant sur l'analyse des retours d'expérience territoriaux documentés sur le bassin. L'objectif est de fournir aux maîtres d'ouvrage et aux bureaux d'études spécialisés un cadre de référence permettant d'optimiser les choix méthodologiques selon les contextes locaux et les moyens disponibles.

L'enjeu dépasse la seule dimension technique pour s'inscrire dans une perspective plus large de construction de la résilience territoriale face aux défis climatiques et démographiques contemporains, au même titre que les enjeux de sobriété des usages et les économies d'eau. Les zones de sauvegarde constituent un outil privilégié de cette démarche préventive, à condition que leur délimitation repose sur des bases scientifiques solides et une approche de gouvernance adaptée à la géographie réelle des ressources en eau souterraine.

I. Cadre général et spécificités karstiques

A. Contexte et enjeux

Dans le contexte actuel de changement climatique et de pression croissante sur les ressources en eau, la question de la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable devient prépondérante pour les collectivités territoriales. Cette problématique revêt une dimension particulière dans les aquifères karstiques, qui représentent environ 25% des ressources en eau souterraine à l'échelle mondiale et alimentent près de 40% de la population européenne (Ford & Williams, 2007).

Sur le bassin Rhône-Méditerranée, les SDAGE successifs appliquent depuis 2010 la disposition 5E01 d'identification des ressources stratégiques. Le caractère stratégique d'une ressource se définit selon trois critères cumulatifs établis par le SDAGE : conformité qualitative aux normes de potabilité, importance quantitative significative pour l'alimentation en eau potable, et localisation géographique favorable pour la desserte des populations. Parmi les 127 masses d'eau identifiées à fort enjeu AEP dans lesquelles le SDAGE Rhône-Méditerranée demande de caractériser les ressources stratégiques, une proportion significative concerne des aquifères karstiques, particulièrement dans la partie nord du bassin (massif jurassien, formations carbonatées alpines et méditerranéennes). Malgré cette identification, la mise en œuvre effective des démarches de protection demeure hétérogène.

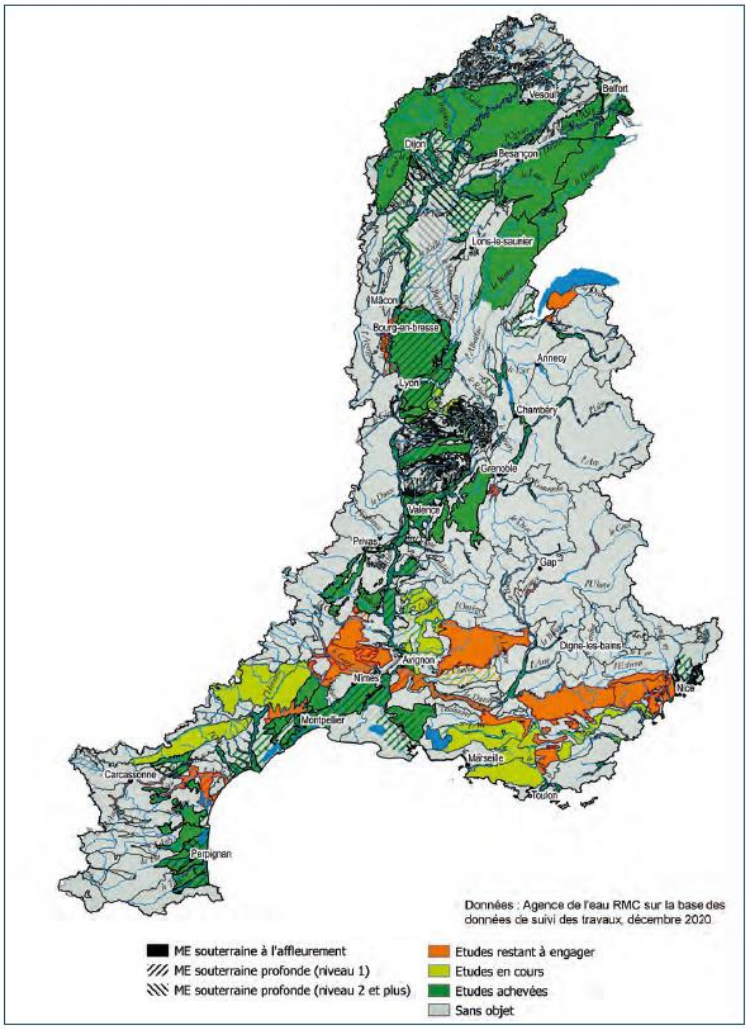


Figure 1 : État d'avancement des études de ressources stratégiques du bassin Rhône-Méditerranée

Note : Sur la région Bourgogne Franche-Comté, les études "achevées" concernent l'identification des ressources stratégiques, mais leurs zones de sauvegarde restent encore à délimiter et la stratégie de préservation à définir.

La préservation des ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable s'inscrit dans une démarche globale structurée en quatre phases complémentaires définies par le SDAGE Rhône-Méditerranée :

1. Identification, délimitation et caractérisation des ressources stratégiques dans les masses d'eau souterraine à enjeu AEP identifiées par le SDAGE. Cette phase initiale valide le caractère stratégique des ressources selon les critères quantitatifs, qualitatifs et géographiques établis.
2. Délimitation des zones de sauvegarde des ressources stratégiques validées, distinguant les zones de production (Zone 1) et les zones d'alimentation (Zone 2), avec hiérarchisation selon les niveaux de vulnérabilité et de pression.
3. Définition d'une stratégie de préservation avec des actions pertinentes et graduées sur les zones de sauvegarde, adaptées aux spécificités territoriales et proportionnées aux enjeux identifiés.
4. Mise en œuvre du plan d'actions de préservation, incluant notamment la transcription des enjeux dans les documents d'urbanisme (PLU, SCoT) et la mobilisation des outils réglementaires appropriés.

Cette note d'accompagnement se concentre principalement sur les phases 1 et 2 (validation du caractère stratégique et délimitation des zones de sauvegarde), en développant les méthodologies spécifiques aux aquifères karstiques. Elle aborde également certains éléments de la phase 3 (principes de hiérarchisation et d'adaptation des mesures de protection selon les zones), mais ne traite pas la phase 4 (opérationnalisation et transcription réglementaire), qui fait l'objet de guides complémentaires développés par l'Agence de l'Eau RMC et les services de l'État.

Cette note d'accompagnement répond à trois constats convergents révélant la nécessité d'harmoniser les pratiques sur le bassin Rhône-Méditerranée. Premièrement, on observe une forte hétérogénéité d'avancement des démarches à l'échelle de la partie nord du bassin. Si les démarches d'identification des ressources stratégiques sont achevées depuis 2016, les volets délimitation et préservation présentent des degrés d'avancement très variables selon les territoires, créant une mosaïque d'approches parfois incohérentes entre collectivités voisines. En Bourgogne-Franche-Comté, région emblématique des grands systèmes karstiques jurassiens, ce constat est particulièrement marqué : les études d'identification des ressources stratégiques sont achevées, mais leurs zones de sauvegarde restent encore à délimiter et la stratégie de préservation à définir sur la majorité du territoire. Deuxièmement, la récurrence d'épisodes de sécheresse exceptionnels a accéléré l'engagement des collectivités dans les démarches de préservation. Ces épisodes ont révélé la vulnérabilité particulière des systèmes karstiques et l'urgence de sécuriser les approvisionnements futurs, poussant de nombreuses collectivités à engager simultanément des études de ressources stratégiques. Enfin, si les spécificités du karst sont reconnues dans le guide bassin de l'AERMC, celui-ci offre peu d'orientations méthodologiques opérationnelles spécifiquement adaptées à ces aquifères complexes à l’exception d’un CCTP dédié aux aquifères karstiques. Les collectivités se trouvent donc confrontées à la nécessité de développer des approches méthodologiques adaptées, mobilisant des outils dédiés.

B. Spécificités hydrogéologiques des aquifères karstiques

1. Hétérogénéité structurelle fondamentale

Les aquifères karstiques se distinguent fondamentalement des autres types d'aquifères par des caractéristiques hydrogéologiques particulières résultant des processus de karstification. Ce phénomène de dissolution chimique des roches carbonatées crée un réseau de vides interconnectés de tailles très variables, depuis les microfissures de quelques micromètres jusqu'aux conduits de plusieurs mètres de diamètre.

Cette hétérogénéité constitue la caractéristique fondamentale de ces aquifères et se manifeste à différentes échelles spatiales. À l'échelle du réseau de conduits, elle se traduit par l'alternance de zones à forte et faible perméabilité, créant des chemins préférentiels d'écoulement qui concentrent la majeure partie des flux. À l'échelle du massif, elle induit un compartimentage hydrogéologique dicté par l'architecture structurale. À l'échelle régionale, elle génère une variabilité des systèmes selon le contexte géologique et climatique.

2. Dualité de fonctionnement caractéristique

Les aquifères karstiques présentent une dualité de fonctionnement caractérisée par la coexistence de composantes capacitive (stockage dans la porosité de fissures et matrice rocheuse) et transmissive (circulation rapide dans les conduits karstiques) aux propriétés hydrogéologiques contrastées (Mangin, 1975). Cette architecture confère une vulnérabilité spécifique : le transit dans les conduits s'effectue à des vitesses pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres par heure lors des crues (Käss, 1998), limitant drastiquement les capacités d'atténuation naturelle comparativement aux aquifères poreux.

3. Variabilité temporelle du fonctionnement

La variabilité temporelle constitue une autre spécificité majeure des systèmes karstiques, directement liée à la dualité de fonctionnement décrite précédemment. En période de basses eaux, les écoulements se concentrent dans les drains principaux avec des temps de transfert relativement longs et une contribution préférentielle de la composante capacitive. En période de hautes eaux, l'activation de connexions hydrauliques temporaires, l'augmentation des vitesses d'écoulement dans le réseau transmissif et la remobilisation d'eaux stockées dans la matrice rocheuse modifient drastiquement le fonctionnement du système. Cette variabilité explique la propagation contaminations survenues à plusieurs kilomètres des exutoires vers les points de captage en quelques heures, démontrée par de nombreux traçages artificiels.

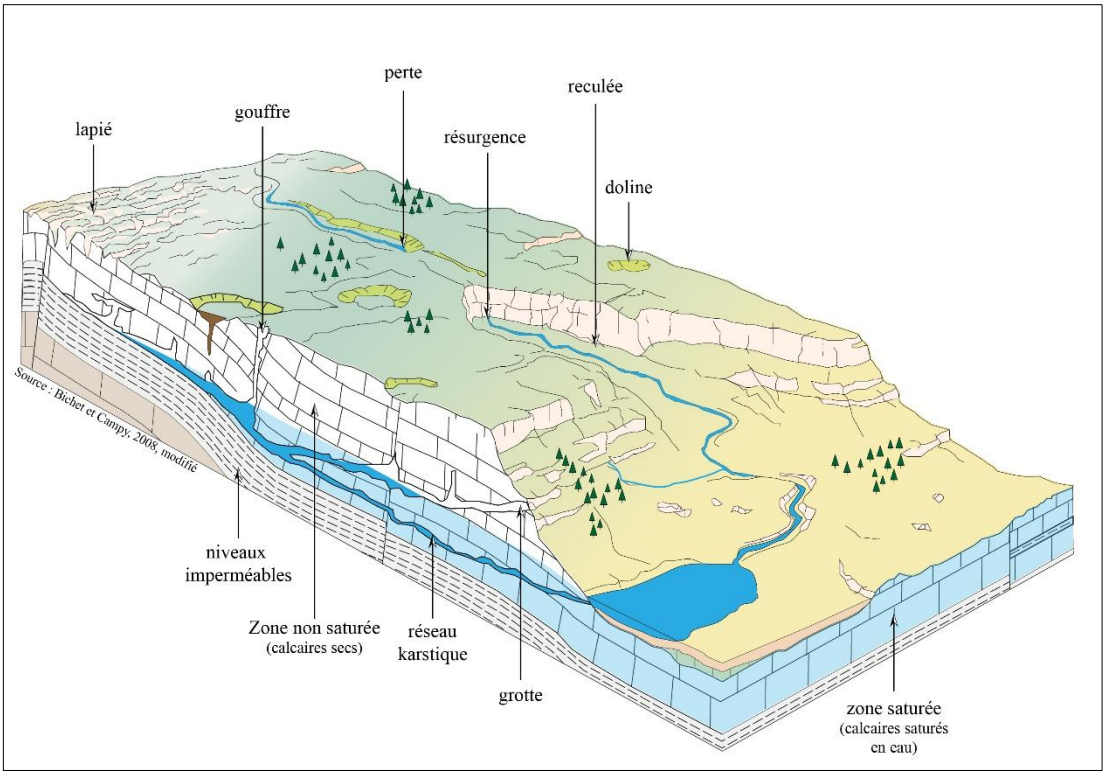


Figure 2 : Représentation d'un aquifère karstique (modèle jurassien, d'après Bichet et Campy, 2008)

II. Validation et caractérisation des ressources stratégiques

A. Processus de validation des ressources stratégiques

La validation du caractère stratégique d'une ressource karstique constitue un prérequis à la délimitation des zones de sauvegarde. Elle s'avère particulièrement nécessaire pour les ressources identifiées initialement à dire d'expert ou sur la base de données anciennes, afin de confirmer qu'elles répondent toujours aux critères quantitatifs, qualitatifs et géographiques établis par le SDAGE. Cette validation conditionne l'ensemble de la démarche ultérieure et justifie les investissements méthodologiques associés.

Le processus de validation s'appuie sur une compilation exhaustive des données existantes selon les modalités du guide AERMC (chapitre 3.1). En contexte karstique, cette compilation intègre prioritairement les données spécialisées déterminantes : données spéléologiques, traçages existants, chroniques de sources et analyses structurales conditionnant la compréhension du fonctionnement hydrogéologique.

Évaluation quantitative spécifique aux systèmes karstiques. L'évaluation quantitative s'avère critique : des ressources identifiées comme stratégiques par expertise peuvent ne pas répondre aux critères quantitatifs après actualisation méthodologique rigoureuse. Cette situation est particulièrement fréquente pour les ressources karstiques en raison de leur forte variabilité de productivité. Il convient de préciser qu'il n'existe pas de valeur seuil universelle pour les critères quantitatifs permettant de qualifier une ressource de stratégique. Ces seuils doivent être adaptés au contexte hydrogéologique local et au type d'aquifère. Par exemple, un

débit de 100 000 m³/an peut être stratégique pour un aquifère karstique de faible extension en zone de moyenne montagne, alors qu'il serait considéré comme marginal dans un grand système karstique de plateau.

L'évaluation intègre les spécificités karstiques : variabilité temporelle des débits naturels et caractérisation des débits d'étiage (QMNA, VCN) permettant d'estimer les volumes prélevables durablement. Le respect des débits biologiques aux exutoires doit également être pris en compte, ces derniers étant indispensables au maintien des écosystèmes aquatiques et des zones humides associées, souvent remarquables. L'analyse des chroniques de production sur plusieurs années permet de caractériser cette variabilité saisonnière et interannuelle caractéristique. Avant d'écarter une ressource sur la base d'un débit d'étiage faible à l'exutoire, il convient aussi d'évaluer le potentiel des zones noyées qui pourraient être exploitées par forage profond avec gestion active (pompage). Ces réserves souterraines, situées sous le niveau de l'exutoire, peuvent représenter un volume exploitable significatif même lorsque le débit naturel d'étiage est limité.

L'exemple des Corbières illustre cette approche avec des critères quantitatifs précis (ANTEA GROUP, 2014) : un volume annuel de 100 000 m³ comme seuil pour les ouvrages structurants, permettant de retenir sept ouvrages significatifs (forages des Mailloles : 378 851 m³/an, Croix Blanche : 314 748 m³/an). L'Ardèche montre une approche différenciée selon le type d'aquifère : 300 000 m³/an pour l'Urgonien, 100 000 m³/an pour le Jurassique et le Trias.

Il convient de distinguer les chroniques de production, qui correspondent aux volumes effectivement prélevés aux ouvrages de captage, des chroniques de débits naturels aux exutoires. Ces deux types de données présentent des valeurs et des comportements différents selon les modalités d'exploitation (captage gravitaire, pompage en zone noyée) et doivent être utilisées de manière appropriée selon l'objectif de l'analyse.

Évaluation qualitative et géographique. L'évaluation qualitative vérifie la conformité aux paramètres réglementaires (directive 98/83/CE), en ciblant les paramètres critiques en contexte karstique : nitrates, pesticides et turbidité.

Dans une perspective prospective, l'évaluation qualitative devrait également intégrer les polluants émergents non encore réglementés mais susceptibles d'affecter la ressource à moyen terme, notamment les substances perfluoroalkylées et polyfluoroalkylées (PFAS), les résidus pharmaceutiques et les microplastiques.

L'évaluation géographique intègre les contraintes d'implantation spécifiques aux systèmes karstiques, nécessitant une compréhension fine de l'architecture souterraine pour optimiser les taux de réussite des forages et les débits mobilisables.

Dimension prospective climatique. Une dimension prospective essentielle concerne l'impact du changement climatique sur la disponibilité future. Une ressource déjà limite aujourd'hui risque de devenir insuffisante dans les décennies à venir, particulièrement dans le contexte d'intensification des épisodes de sécheresse. L'évaluation des besoins actuels quantifie trois composantes : population desservie, volumes prélevés et taux d'utilisation des capacités de production. Les aquifères karstiques présentent une forte variabilité saisonnière des ressources. Cette analyse doit donc distinguer les besoins moyens des besoins de pointe saisonniers. L'intégration de la dimension prospective climatique nécessite le recours systématique aux

projections hydroclimatiques régionalisées disponibles via les plateformes DRIAS et le programme Explore2 (2024), qui constituent les référentiels actualisés pour le bassin Rhône-Méditerranée. L'évaluation du caractère stratégique doit mobiliser les métriques hydrologiques standardisées (modules annuels, QMNA, VCN10, durées de tarissement) selon différents scénarios d'émission (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) et horizons temporels (2030-2050, 2050-2070). Cette analyse comparative entre régimes actuels et régimes projetés permet d'identifier les ressources dont la productivité future pourrait être substantiellement altérée, nécessitant une réévaluation de leur capacité à satisfaire les besoins à long terme. La sensibilité climatique des aquifères karstiques présente une forte variabilité selon leur typologie hydrodynamique : les systèmes à forte composante capacitive et zone noyée développée démontrent une résilience accrue aux déficits pluviométriques, tandis que les systèmes à dominante transmissive présentent une réactivité marquée aux variations de recharge. Cette différenciation typologique doit orienter les stratégies de sécurisation, en privilégiant le développement de ressources à forte inertie pour les territoires confrontés aux projections les plus défavorables.

B. Approche conceptuelle et zonage hiérarchisé

L'approche spatiale du guide AERMC distingue les Zones de Sauvegarde Exploitées (ZSE) et Non Exploitées Actuellement (ZSNEA), associant préservation immédiate des ZSE et approche préventive à long terme des ZSNEA.

Ces deux notions s'articulent avec le zonage hydrogéologique propre au contexte karstique (Zone 1 / Zone 2) selon une logique complémentaire : le premier distingue les ressources selon leur statut d'exploitation, le second selon leur rôle fonctionnel dans le système aquifère. Le tableau suivant synthétise cette articulation.

	Zone 1 (production)	**Zone 2 (alimentation)**
ZSE	Portions productives de l'aquifère actuellement exploité (exutoire, drains, zone noyée)	Impluvium complet alimentant la ressource exploitée
ZSNEA	Portions productives de l'aquifère identifié pour une exploitation future	Impluvium complet alimentant la ressource future

Tableau 1 : Articulation entre zonage réglementaire (ZSE/ZSNEA) et zonage hydrogéologique (Zone 1/Zone 2) en contexte karstique

Les ressources stratégiques sont identifiées au sein de masses d'eau souterraine, qui constituent les unités de gestion cohérentes définies par la Directive Cadre sur l'Eau. En contexte karstique, la délimitation des zones de sauvegarde associées à ces ressources s'organise en deux zones spécifiques :

Zone de production (Zone 1) : portions d'aquifères les plus productives incluant l'exutoire, les drains concentrant les écoulements rapides, et les réserves annexes de la zone noyée. Selon le guide (AERMC, 2021) "*en dehors de l'exutoire, il s'agit de la zone au sein de laquelle un forage aura une forte probabilité d'être positif avec un fort taux de réussite*". Il convient de préciser que les limites des zones de production ne constituent pas des frontières absolues mais correspondent à un gradient de potentiel de productivité. Ces limites peuvent être ajustées en

fonction des objectifs d'exploitation et des investigations complémentaires, notamment lorsque l'on s'éloigne des drains principaux ou que l'épaisseur de la zone noyée devient limitante.

Zone d'alimentation (Zone 2) : impluvium des zones productives, c'est-à-dire toute la surface contributive à leur alimentation

Cette approche dépasse les seuls affleurements calcaires en intégrant les bassins imperméables participant à la recharge via les pertes lorsqu'ils contribuent significativement à l'alimentation. L'exemple des Corbières Orientales illustre cette complexité : système binaire où 60% de l'alimentation provient des pertes de l'Agly et du Verdouble et 40% de l'infiltration directe sur les affleurements calcaires (ANTEA GROUP, 2014).

La classification hiérarchisée permet d'adapter l'intensité des mesures de protection au niveau de risque identifié, optimisant l'efficacité tout en minimisant les contraintes économiques. Cette hiérarchisation favorise l'acceptabilité sociale et la mise en œuvre effective des politiques de préservation. Ces méthodologies intègrent les spécificités karstiques dans une approche systémique combinant caractérisation des zones de production, évaluation des modalités d'alimentation, et analyse des pressions anthropiques. La validation du caractère stratégique constitue un prérequis aux méthodologies de délimitation développées au chapitre suivant.

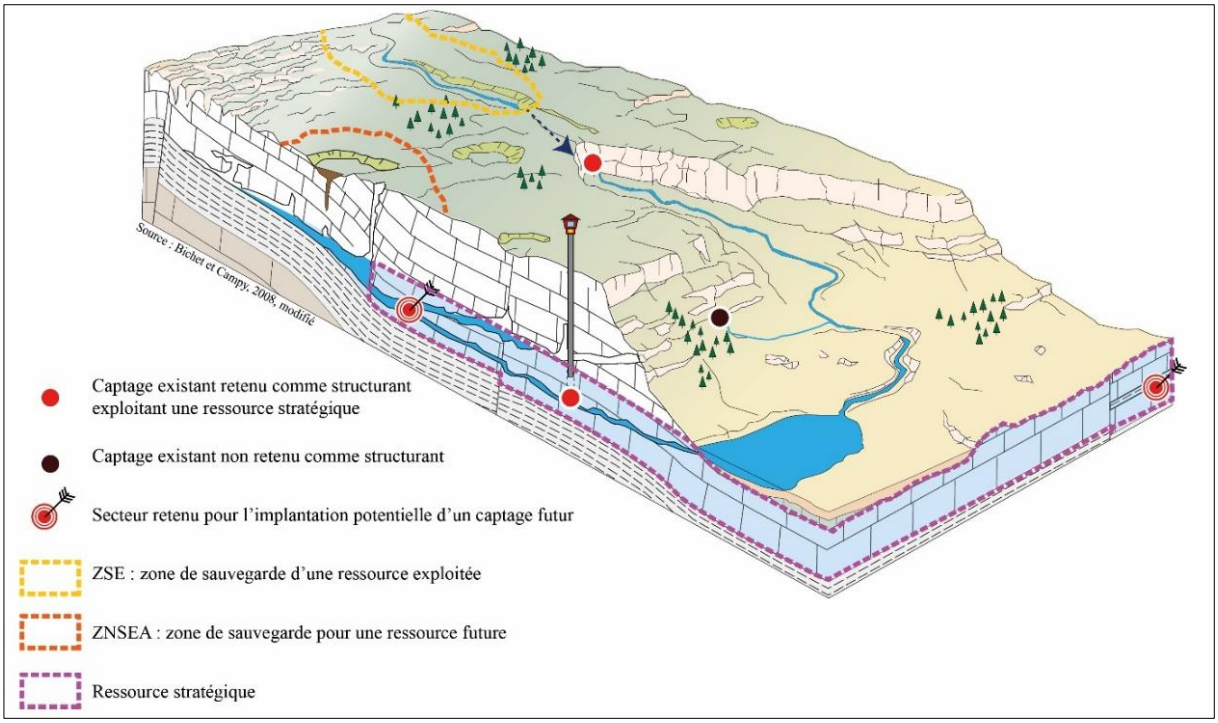


Figure 3 : Imbrication des différentes notions spatiales selon l'AERMC

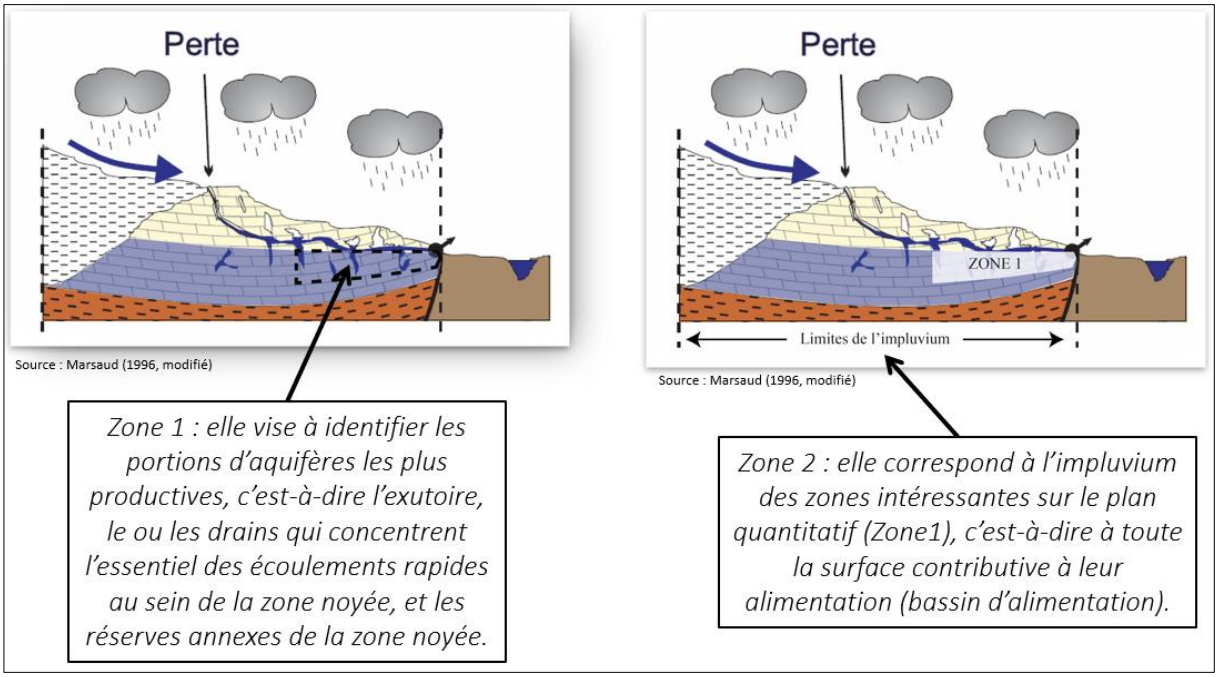


Figure 4 : Représentation schématique des deux zonages spécifiques en contexte karstique

III. Méthodologies de délimitation des zones de sauvegarde

Ce chapitre développe les méthodes spécialisées adaptées à la complexité des systèmes karstiques, en complément du guide AERMC 2021 (chapitre 3.3 du guide). La délimitation s'organise selon une approche méthodologique intégrée distinguant les zones de production (Zone 1), les zones d'alimentation (Zone 2), et leur hiérarchisation selon les pressions anthropiques.

Avertissement sur l'évaluation des coûts : L'échelle de coûts utilisée dans les tableaux comparatifs (Faible → Modéré → Élevé) est volontairement imprécise. Les coûts réels dépendent de nombreux facteurs variables : disponibilité des données existantes, complexité du système étudié, superficie du bassin d'alimentation, expertise des opérateurs, conditions d'accès au terrain, et contexte concurrentiel local. À titre d'exemple, la télédétection peut être économique si les données LIDAR ou images satellite sont déjà acquises ou disponibles gratuitement via les portails institutionnels, mais coûteuse si elle nécessite l'acquisition de nouvelles données. Cette classification doit donc être considérée comme un ordre de grandeur relatif plutôt qu'une estimation budgétaire précise.

A. Délimitation des zones de production (Zone 1)

1. Délimitation et caractérisation des zones de production

Les ressources en eau du massif karstique s'écoulent principalement aux exutoires naturels, qui vidangent la partie d'aquifère située au-dessus du niveau des exutoires. Cependant, un volume non négligeable peut être stocké dans les zones noyées de l'aquifère lorsque les structures géologiques le permettent. La porosité des aquifères karstiques étant faible, généralement estimée à 1 ou 2%, le volume de l'aquifère situé en-dessous du niveau des exutoires peut néanmoins être important si le réseau de drains et de fractures est suffisamment ramifié et connecté pour en permettre l'exploitation.

L'exploitation des ressources profondes peut se faire par pompage, soit dans des vasques vauclusiennes correspondant à des sources alimentées par un drain remontant, soit dans des forages qui recoupent des drains ou des zones fracturées. Les zones noyées sont la plupart du temps en relation avec des sources, mais peuvent parfois être déconnectées des exutoires connus, constituant alors des réserves cachées d'un intérêt particulier pour la sécurisation de l'approvisionnement.

La délimitation des zones de production repose sur l'identification des « pièges » structuraux assurant un niveau d'eau élevé : failles étanches, changements de faciès lithologique ou structures plissées complexes. L'épaisseur minimale retenue pour la délimitation est généralement fixée à 100 mètres, garantissant un volume de réserve exploitable durablement.

2. Modalités d'exploitation et choix stratégiques

La délimitation des zones de production doit tenir compte des différentes modalités d'exploitation envisageables, dont le choix influence directement l'extension spatiale des zones à protéger. Trois principales modalités se distinguent :

Captage à l'exutoire naturel : exploitation gravitaire au niveau de l'émergence, solution la plus économique mais limitée aux débits naturels d'étiage. Cette modalité permet de capter "facilement" une partie du débit naturel sans risque d'échec lié à l'hétérogénéité karstique, mais expose davantage aux contaminations transitant par les drains principaux (risques bactériologiques et de turbidité accrus).

Exutoire aménagé : rehausse du niveau d'eau par barrage souterrain ou galerie captante, permettant d'augmenter les réserves mobilisables tout en conservant les avantages de l'exploitation gravitaire.

Forages en zone noyée : exploitation par pompage des réserves profondes situées sous le niveau de l'exutoire, nécessitant une gestion active mais offrant plusieurs avantages : capacité de régulation accrue, affranchissement des circulations rapides dans les drains principaux (limitation des risques de contamination), et possibilité de surexploitation temporaire de la ressource qui pourra être renouvelée lors de la période de recharge suivante.

Le choix de la modalité d'exploitation doit être intégré dès la phase d'étude, en particulier pour les ressources stratégiques futures (ZSNEA), car il conditionne directement la délimitation spatiale des zones de production et les stratégies de protection associées.

3. Méthodes de modélisation et d'investigation

Analyse des chroniques de sources

L'analyse des chroniques de sources, développée dans les travaux de Mangin (1975), permet la caractérisation de la structure interne des systèmes karstiques et l'estimation de leurs principales propriétés hydrodynamiques. Cette approche s'appuie sur la décomposition du signal hydrologique en différentes composantes d'écoulement, correspondant aux différents réservoirs contributeurs du système (drainage rapide par les conduits, vidange des réserves capacitives, infiltration diffuse). L'exploitation opérationnelle nécessite des chroniques de débits continues d'au moins trois années hydrologiques complètes, intégrant idéalement des épisodes contrastés (crues exceptionnelles, étiages sévères) permettant de caractériser la gamme complète des comportements hydrodynamiques. Les résultats constituent un référentiel de cohérence pour compléter les délimitations issues d'approches spatiales directes (modélisation géologique, géophysique) plutôt qu'une méthode autonome de délimitation.

Application aux zones de sauvegarde. L'analyse des coefficients de récession permet d'estimer les volumes dynamiques mobilisables et d'identifier les périodes critiques de faible productivité. La délimitation spatiale des zones de production s'effectue ensuite par extrapolation géologique, en considérant que les volumes de drainage calculés correspondent aux secteurs de plus forte karstification identifiés sur les cartes géologiques et structurales.

Il est important de noter que cette approche caractérise principalement les réserves situées au-dessus de l'exutoire et ne prend pas en compte les zones noyées situées sous ce niveau, qui peuvent constituer des réserves exploitables significatives par forage, à l'exception des systèmes de type vauclusien, dont la remontée phréatique permet une connexion naturelle avec ces réserves profondes. Ces approches hydrologiques présentent l'avantage d'une mise en œuvre relativement aisée et économique, mais leur caractère non spatialisé ne permet pas de localiser

précisément les zones de production sans couplage avec des données géologiques et structurales.

Représentation bidimensionnelle

La représentation bidimensionnelle reste applicable pour les systèmes de complexité modérée. Cette approche repose sur la lecture des cartes géologiques et la compilation des coupes géologiques disponibles. Les limites dessinées correspondent à l'extension des aquifères noyés localisés sous la cote de leur exutoire et tiennent compte des barrières étanches constituées par les failles.

Application aux zones de sauvegarde. La projection géologique des formations aquifères favorables (calcaires massifs, zones fracturées) délimite les zones de production en intégrant les contraintes tectoniques. L'épaisseur minimum de 100 mètres de zone noyée permet de garantir des réserves exploitables et de fixer des limites géométriques précises intégrables dans les documents d'urbanisme.

Méthodes multicritères adaptées

Les méthodes multicritères de type EPIK, RISKE et PaPRIKA ont été développées pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques en combinant critères de surface (Infiltration, Protection) et critères souterrains (Roche, Karstification) (Doerfliger et al., 1999 ; Plagnes et al., 2010 ; OFEV, 2025). La présente note propose d'extraire uniquement les critères souterrains pour la délimitation des zones de production (Zone 1).

Application aux zones de sauvegarde**.** Les critères "Roche" et "Karstification" caractérisent directement le degré de développement du réseau karstique et identifient les secteurs à fort potentiel de productivité par cartographie multicritères. Les zones obtenant les scores élevés constituent les zones de production prioritaires, hiérarchisées selon l'intensité du développement karstique.

Cependant, la relation entre degré de karstification et productivité effective peut être complexe : un secteur fortement karstifié peut drainer vers un exutoire distant ou présenter une transmissivité élevée mais des capacités de stockage limitées. Cette délimitation préliminaire nécessite donc une validation par des données hydrodynamiques directes (chroniques de sources, essais de pompage, traçages artificiels) permettant de confirmer la productivité réelle et les connexions hydrauliques effectives.

Traçages artificiels

Les traçages artificiels constituent l'outil de référence pour la validation des modèles conceptuels et la caractérisation des écoulements souterrains en milieu karstique (Käss, 1998). L'utilisation de traceurs fluorescents permet d'estimer les taux de restitution, de confirmer l'existence de limites d'alimentation.

Application aux zones de sauvegarde : Les traçages permettent de valider les limites des bassins d'alimentation souterrains et d'identifier précisément les zones de drainage actif constituant les zones de production. Ils confirment ou infirment les hypothèses de délimitation issues d'autres méthodes et permettent de quantifier les débits de connexion entre secteurs, information cruciale pour la hiérarchisation des zones selon leur importance productive.

Modélisation tridimensionnelle par Visual KARSYS

La modélisation tridimensionnelle par Visual KARSYS répond aux systèmes karstiques complexes disposant de données géologiques 3D de haute qualité. Cette modélisation automatise la délimitation des bassins versants souterrains, dépassant les approches surfaciques traditionnelles.

Application aux zones de sauvegarde**.** L'approche KARSYS génère automatiquement des délimitations précises des bassins d'alimentation souterrains et identifie les zones de production par analyse de l'architecture 3D des écoulements. Les zones noyées sont cartographiées selon leur géométrie réelle, permettant une estimation volumétrique des réserves et une délimitation géoréférencée directement utilisable pour les zonages réglementaires. L'approche KARSYS s'appuie sur une conceptualisation rigoureuse de l'architecture hydrogéologique 3D en intégrant la géométrie des formations aquifères, la distribution des zones de recharge, l'architecture du réseau de drainage souterrain, et les connexions hydrauliques entre compartiments.

Investigations directes

Les investigations directes par forages d'exploration et pompage d'essai caractérisent les propriétés hydrodynamiques des zones de production avec la fiabilité maximale. Ces investigations accèdent physiquement aux aquifères et mesurent in situ leurs caractéristiques de productivité.

Application aux zones de sauvegarde. Les forages d'exploration fournissent une information ponctuelle dans un milieu karstique hétérogène, attestant de l'existence locale d'une zone noyée productive (lorsqu'ils sont positifs), mais ne permettant pas, à eux seuls, de délimiter précisément l'extension spatiale de la zone de production. Ils doivent être couplés à d'autres approches (modélisation géologique, géophysique) pour extrapoler les résultats à l'échelle du système.

Les méthodes géophysiques permettent la reconnaissance indirecte de la structure géologique et des zones de failles. Ces investigations sont particulièrement utiles pour identifier les zones de forte fracturation et les conduits karstiques majeurs (Chalikakis et al., 2011).

La résistivité électrique constitue la méthode de référence pour la caractérisation des contrastes karstiques. Les zones de forte karstification présentent des résistivités élevées liées aux vides karstiques remplis d'air ou d'eau peu minéralisée, contrastant avec les formations compactes moins karstifiées (Chalikakis et al., 2011) voire imperméables (argiles). La tomographie électrique permet de cartographier ces contrastes en 2D et 3D, révélant l'architecture des réseaux de conduits et des zones de forte perméabilité.

Les méthodes électromagnétiques (VLF, EM31, EM34) permettent de détecter les zones conductrices correspondant aux formations argileuses ou aux eaux souterraines fortement minéralisées, aidant à identifier les barrières d'écoulement et les limites d'aquifères.

La sismique réflexion constitue la principale méthode sismique utilisée pour la caractérisation des aquifères karstiques. Elle permet de localiser les interfaces géologiques majeures et de caractériser les structures tectoniques (failles, chevauchements) contrôlant le compartimentage hydrogéologique. Malgré un coût plus élevé que les méthodes électromagnétiques, elle offre une résolution tridimensionnelle adaptée aux études de ressources stratégiques complexes. La

sismique réfraction reste peu utilisée dans ce contexte en raison de sa résolution limitée en milieu hétérogène.

Les méthodes de radar géologique (GPR) permettent d'identifier les conduits karstiques peu profonds et les zones de fracturation intense avec une résolution décimétrique, particulièrement efficaces dans les calcaires secs (Beres et Haeni, 1991). Leur intérêt principal réside dans la capacité à caractériser l'hétérogénéité structurale tridimensionnelle des aquifères sans recourir systématiquement aux forages exploratoires, dont les coûts peuvent être prohibitifs pour les collectivités

Application aux zones de sauvegarde. La géophysique cartographie les contrastes de des propriétés physiques du milieu révélant les secteurs de forte karstification et les réseaux de conduits constituant les zones de production les plus actives. L'identification des structures géologiques (failles, contacts lithologiques) précise les limites aquifères selon leur géométrie structurale réelle plutôt que par extrapolation. Les anomalies géophysiques orientent l'implantation optimale des ouvrages de captage futurs.

Méthode	Avantages	Limites	Applicabilité	Coût	Références
Chroniques sources	Facilité de mise en œuvre. Intégration variabilité temporelle. Coût très accessible	Approche non spatiale. Nécessite chroniques longues. Localisation imprécise des zones. Informations sur les réserves au dessus des exutoires	Systèmes simples. Chroniques disponibles>3 ans	Faible	Mangin (1975, 1984), Labat et al. (2000)
2D conventionnelle	Coût maîtrisé. Basé sur données géologiques classiques. Accessible techniquement	Simplification des écoulements 3D. Précision limitée pour systèmes complexes. Dépendant de la fiabilité des cartes géologiques	Systèmes simples. Contextes peu fracturés	Faible	Caille et Idées Eaux (2014)
Multicritères (EPIK/PaPRIKA)	Intégration de critères multiples. Évaluation du degré de karstification. Données standardisées disponibles	Subjectivité de la pondération. Disponibilité des données pour bien discréditer. Validation hydrodynamique nécessaire.	Systèmes simples à modérés. Première approche économique	Modéré	Doerfliger et al. (1999), Plagnes et al. (2010)
Traçages artificiels	Validation directe des connexions. Quantification des transferts. Temps de résidence réels	Conditions hydrologiques dépendantes. Ne révèle que connexions actives	Validation systèmes complexes. Connexions critiques identifiées	Modéré	Käss (1998)
Géophysique	Caractérisation structurale directe. Identification des zones fracturées. Validation des modèles géologiques	Interprétation indirecte. Nécessite calibration par forages	Systèmes modérément complexes. Lacunes données géologiques	Modéré	Chalikakis et al. (2011), Beres et Haeni (1991), Iván et Mádl-Szőnyi (2017)
KARSYS 3D	Modélisation rigoureuse de l'architecture 3D. Délimitation automatisée des bassins. Reproductibilité élevée	Nécessite données géologiques 3D complètes. Expertise technique spécialisée. Coût élevé	Systèmes complexes bien documentés. Enjeux majeurs (>50 000 hab.)	Élevé	Jeannin et al. (2013), ISSKA (2021a)
Investigations directes	Validation définitive zones de production. Données hydrodynamiques quantitatives précises. Mesures in situ fiables	Coût très élevé. Délais d'exécution importants. Accès terrain parfois difficile	Validation finale. Systèmes à enjeux majeurs. Dimensionnement d'ouvrages	Élevé	White (2002), Ford et Williams (2007)

Tableau 2 : Comparaison des méthodes de délimitation Zone 1

Pour les systèmes de complexité modérée à élevée, il est recommandé de coupler plusieurs méthodes complémentaires :

- Association modélisation géologique 3D + traçages artificiels pour valider les connexions hydrauliques.
- Couplage géophysique + forages ciblés pour optimiser les investigations.
- Intégration chroniques sources + modélisation pour valider la cohérence quantitative.

Cette approche intégrée permet de compenser les limites de chaque méthode prise isolément et d'obtenir des délimitations plus robustes avec un niveau d'incertitude maîtrisé.

4. Exemple des sources du Dessoubre : la modélisation 3D

L'étude des sources du Dessoubre illustre l'apport de la modélisation 3D pour la compréhension des systèmes karstiques complexes (ISSKA, 2024c). L'application de la méthodologie KARSYS a conduit à une révision majeure du bassin d'alimentation, réévalué à 197 km² contre 123 km² estimés en 2013 par des approches empiriques, soit une augmentation de 60%. Cette révision substantielle démontre les limites des approches traditionnelles et l'importance d'une modélisation rigoureuse pour les systèmes complexes. Cependant, cette avancée méthodologique met également en évidence les lacunes persistantes dans la documentation de base de nombreux systèmes karstiques. Le cas du Dessoubre révèle que malgré les progrès dans la délimitation des bassins d'alimentation, les données fondamentales sur le fonctionnement des exutoires restent insuffisantes, avec des régimes d'activité mal documentés et des débits peu mesurés.

L'étude a révélé une architecture hydrogéologique tridimensionnelle remarquable avec trois nappes principales constituant les zones de production. L'aquifère du Jurassique supérieur constitue la nappe principale alimentant les sources du Dessoubre et représente 76 km² du bassin d'alimentation total. Cette nappe principale concentre l'essentiel des écoulements et présente les débits les plus importants. L'aquifère supérieur forme une nappe intermédiaire de transition, dont une partie est drainée par la source du Moulin du Bois tandis que l'autre partie cascade vers l'aquifère principal, illustrant la complexité des connexions hydrauliques internes. L'aquifère oriental contribue via des débordements souterrains depuis la zone de Narbief, témoignant des transferts latéraux importants caractéristiques de ces systèmes complexes.

L'application de l'approche KARSYS au système hydrogéologique des sources du Dessoubre a permis d'identifier et de cartographier les principales zones de production, essentiellement des nappes libres de l'aquifère du Jurassique supérieur. Les zones de production sont constituées par les aquifères du Crétacé, du Jurassique supérieur et l'aquifère oriental. L'aquifère du Crétacé n'est pas considéré comme zone de production car son épaisseur ne dépasse pas 50 mètres selon les critères retenus. Cette architecture complexe, révélée par la modélisation 3D, explique certaines caractéristiques du fonctionnement hydrologique observées aux exutoires et valide l'importance d'une approche tridimensionnelle pour la compréhension de ces systèmes. Elle souligne également la nécessité d'adapter les stratégies de protection à cette géométrie réelle des écoulements souterrains plutôt qu'aux approximations surfaciques traditionnelles.

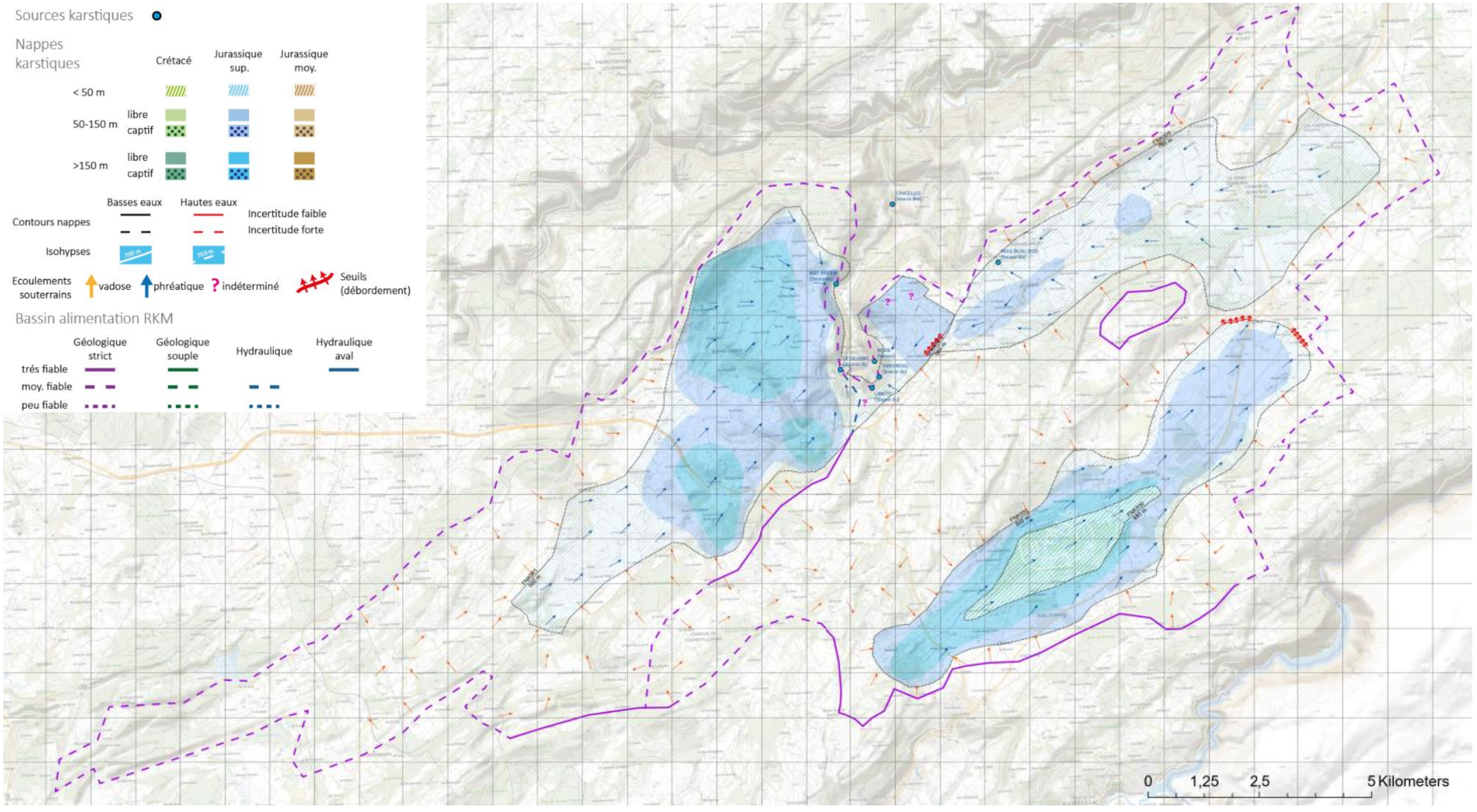


Figure 5 : Systèmes karstiques des sources du Dessoubre selon la modélisation KARSYS (ISSKA, 2024c)

B. Délimitation des zones d'alimentation (Zone 2)

La délimitation des zones d'alimentation (Zone 2) s'effectue selon une approche en deux temps : la délimitation géographique de l'impluvium contributif, puis la caractérisation des modalités d'infiltration et de vulnérabilité au sein de cet impluvium. Cette distinction est fondamentale : la Zone 2 correspond d'abord à l'ensemble du bassin d'alimentation des zones de production, dont les limites sont établies par analyse hydrogéologique et traçages ; la hiérarchisation interne de cette zone selon la vulnérabilité intervient dans un second temps pour l'adaptation des mesures de protection.

1. Caractérisation des modalités d'infiltration

La caractérisation des zones d'alimentation nécessite d'intégrer les modalités différentielles d'infiltration et les processus de recharge spécifiques aux aquifères karstiques. Cette approche identifie et cartographie les conditions d'infiltration différentielles selon les modalités de recharge : directes ou indirectes, concentrées ou diffuses.

Objets karstiques singuliers. L'identification des objets karstiques singuliers structure cette caractérisation. Les dolines, lapiés, pertes, avens et autres formes d'absorption représentent des points d'entrée privilégiés des eaux de surface vers l'aquifère. Ces objets concentrent l'infiltration sur des surfaces restreintes mais drainent des bassins versants importants, créant des zones de vulnérabilité particulière aux contaminations.

Rôle de l'épikarst. Le rôle de l'épikarst doit également être pris en compte dans cette caractérisation. Cette zone superficielle altérée, située au sommet de la formation calcaire, assure une fonction de stockage temporaire des eaux d'infiltration et contrôle les modalités de connexion vers le réseau de conduits profond. Son fonctionnement influence directement la répartition spatiale et temporelle de la recharge de l'aquifère principal, ainsi que les processus d'atténuation naturelle des contaminations potentielles.

2. Méthodes de cartographie et d'analyse

Analyse SIG des données physiographiques du bassin versant

L'analyse SIG des données physiographiques constitue une approche préliminaire de délimitation basée sur la compilation de l'ensemble des données cartographiques facilement disponibles : Modèles Numériques de Terrain (MNT), cartes géologiques et structurales, réseaux hydrographiques, occupation des sols. Cette synthèse permet une première caractérisation du système et de son bassin d'alimentation potentiel, en exploitant les informations topographiques (délimitation du bassin versant de surface, identification des dépressions), géologiques (nature lithologique, pendage des couches) et structurales (failles, discontinuités).

Application aux zones de sauvegarde. Cette approche permet une première approximation rapide et économique de l'extension des zones d'alimentation en contexte karstique simple, où la concordance entre bassins versants topographique et souterrain est probable. Les outils d'analyse spatiale permettent de calculer automatiquement les pentes, les orientations

d'écoulement et d'identifier les zones potentielles de concentration de la recharge (dépressions, zones d'intersection de discontinuités).

La principale limite réside dans la négligence des dimensions spécifiquement karstiques : cette méthode ne prend pas en compte les transferts souterrains liés au réseau de conduits, qui peuvent déconnecter partiellement ou totalement le bassin versant souterrain du bassin topographique de surface. Elle constitue néanmoins une étape préliminaire pertinente pour les études de faisabilité ou pour les systèmes de faible complexité, nécessitant une validation ultérieure par traçages artificiels pour les systèmes plus complexes (Ford & Williams, 2007).

Méthode de vulnérabilité simplifiée IDPR

La méthode de vulnérabilité simplifiée IDPR constitue une approche standardisée largement utilisée pour l'évaluation préliminaire de la vulnérabilité des aquifères (Mardhel et al., 2020). Cette méthodologie a été formalisée et validée pour son applicabilité spécifique aux contextes karstiques.

Application aux zones de sauvegarde. L'IDPR permet d'identifier les zones d'infiltration préférentielle qui constituent l'impluvium des zones de production. Les secteurs à valeurs IDPR faibles (< 1000) correspondent aux zones d'alimentation prioritaires à intégrer dans les zones de sauvegarde, tandis que les valeurs élevées identifient les zones de ruissellement à enjeu moindre pour l'alimentation directe des aquifères.

L'IDPR caractérise les conditions de surface favorisant l'infiltration en analysant la densité et la persistance du réseau hydrographique. En contexte karstique :

- IDPR < 1000 : zones d'infiltration préférentielle (karst développé)
- IDPR > 1000 : zones de ruissellement sur substrats moins perméables

Des zones de transition présentant une infiltration mixte (diffuse et concentrée) peuvent être identifiées et cartographiées séparément lorsque la précision des données le permet.

Carte du Karst ISSKA

La carte du Karst établie par l'ISSKA selon une méthodologie spécifique et reproductible (ISSKA, 2022) renseigne sur les propriétés d'infiltration karstique en surface. Cette cartographie distingue les formations de surface selon leur propriété d'infiltrabilité karstique avec sept classes d'infiltration définies.

Application aux zones de sauvegarde**.** Les formations karstiques et semi-karstiques identifiées par l'ISSKA constituent directement les zones d'alimentation à intégrer dans les zones de sauvegarde. Cette cartographie fournit une première délimitation des impluviums basée sur les propriétés géologiques, utilisable pour un zonage préliminaire rapide avant affinement par méthodes plus spécialisées.

Les classes distinguées sont :

- Formations karstiques : calcaires, dolomites karstification développée
- Formations semi-karstiques : marnes et marno-calcaires à karstification limitée
- Formations évaporitiques : formations susceptibles de dissolution
- Formations non karstiques : formations non solubles

Méthodes multicritères adaptées

En complément de l'extraction des critères souterrains pour la Zone 1, la présente note propose d'extraire les critères de surface des méthodes EPIK, RISKE et PaPRIKA pour la caractérisation des zones d'alimentation (Zone 2). Cette approche se concentre sur les critères directement liés aux modalités de recharge.

Application aux zones de sauvegarde. Les critères Infiltration (I) et Protection (P) hiérarchisent les zones d'alimentation selon leur contribution à la recharge. Les secteurs combinant forte infiltration et faible protection nécessitent une protection renforcée, tandis que les secteurs à infiltration modérée relèvent de mesures graduées.

Critère Infiltration (I) : évalue les conditions de surface favorisant la recharge directe ou concentrée de l'aquifère, intégrant la morphologie de surface, la présence d'objets karstiques d'absorption (dolines, avens, pertes), et les modalités de connexion surface-souterrain.

Critère Protection (P) : caractérise les propriétés des formations de couverture, notamment l'épaisseur et la nature des sols, qui influencent les modalités et l'efficacité de l'infiltration.

Télédétection et systèmes d'information géographique

La télédétection mobilise l'imagerie satellite haute résolution (Pléiades, WorldView, Sentinel-2) pour l'identification des objets karstiques de surface avec une précision métrique. Les approches automatisées par LIDAR haute résolution identifient systématiquement les dolines, avens et autres formes d'absorption (Doctor et Young, 2013 ; Wu et al., 2016).

Application aux zones de sauvegarde. Application aux zones de sauvegarde : La télédétection cartographie les objets karstiques singuliers (dolines, avens, pertes) constituant des zones d'infiltration concentrée prioritaires. Ces objets définissent les secteurs nécessitant une protection renforcée, avec périmètres de sécurité adaptés à leur importance hydrologique. Ces approches s'avèrent particulièrement efficaces dans les zones forestières où la reconnaissance terrain traditionnelle est limitée.

Les données LIDAR haute résolution identifient la microtopographie karstique (dolines, dépressions) avec une précision pluricentimétrique par traitement SIG des modèles numériques de terrain. Des outils d'identification automatique des dépressions karstiques à partir de données LiDAR haute résolution sont en cours de développement, notamment via des approches par apprentissage automatique et analyse morphométrique. Ces outils, tels que DEADKAT développé par le Pôle Karst (EPTB Saône et Doubs, 2026 à paraître), promettent d'améliorer l'efficacité et la reproductibilité de la cartographie des objets karstiques.

Diagnostic karstologique expert

Le diagnostic karstologique expert s'appuie sur la reconnaissance systématique des formes karstiques par prospection de terrain, l'analyse de leur fonctionnement hydrologique actuel et passé, et l'évaluation de leur degré de connexion avec l'aquifère principal.

Application aux zones de sauvegarde. Cette approche établit un zonage fonctionnel opérationnel directement utilisable pour la gestion territoriale, hiérarchisant finement les zones selon leur contribution à l'alimentation des ressources stratégiques.

Méthode	Avantages	Limites	Applicabilité	Coût	Référence bibliographique
Analyse SIG données physiographiques bassin versant	Simplicité conceptuelle, données topographiques et géologiques disponibles, coût faible, approche rapide	Néglige les dimensions associées au karst	Bassin versant de surface	Faible	Ford & Williams (2007)
Indice de persistance des réseaux	Données nationales disponibles. Méthodologie standardisée éprouvée. Efficacité démontrée pour identification zones infiltration karstique	Simplification des processus karstiques complexes. Efficacité variable selon contexte géologique local	Systèmes simples à modérés. Approche préliminaire économique	Faible	Mardhel et al. (2020)
Carte du Karst ISSKA	Cartographie spécialisée des formations karstiques. Classification standardisée reproductible. Couverture nationale homogène	Résolution limitée pour enjeux locaux. Pas d'évaluation des pressions anthropiques	Première approche tous contextes. Zonage préliminaire rapide	Faible	ISSKA (2022)
Méthodes multicritères (PaPRIKa/EPIK critères de surface pour Zone 2 : I, P, E)	Extraction expertise karstologique spécialisée. Critères directement liés aux processus de recharge	Adaptation grilles évaluation nécessaire. Validation hydrogéologique indispensable	Systèmes modérés. Expertise EPIK/PaPRIKA disponible localement	Modéré	Doerfliger et al. (1999), Plagnes et al. (2010)
Télédétection/SIG haute résolution	Identification automatisée objets karstiques. Précision métrique à centimétrique. Efficacité zones forestières difficiles d'accès	Coût variable selon disponibilité données. Interprétation expertise spécialisée requise	Territoires étendus mal documentés. Données LIDAR/satellite disponibles	Modéré	Doctor et Young (2013), Wu et al. (2016)
Diagnostic karstologique expert	Expertise terrain spécialisée, analyse géomorphologique fine, adaptation contexte local, prise en compte fonctionnement hydrologique	Subjectivité expertise, coût investigations terrain, difficulté standardisation, temps de mise en œuvre	Systèmes complexes et nombreuses morphologies de surface	Élevé	CENOTE (2020) ; HYDROFIS (2019, 2021)

Tableau 3 : Comparaison des méthodes de délimitation Zone 2

3. Exemple du Parc Sainte-Baume : le diagnostic karstologique

Le diagnostic karstologique expert (CENOTE, 2020) s'appuie sur la reconnaissance systématique des formes karstiques par prospection de terrain, l'analyse de leur fonctionnement hydrologique actuel et passé, et l'évaluation de leur degré de connexion avec l'aquifère principal. Cette méthodologie intègre la nature des formations géologiques, la densité et l'activité des objets karstiques, les caractéristiques de l'occupation du sol, et les modalités de connexion avec l'aquifère principal. La méthode s'appuie sur une analyse géomorphologique systématique des états de surface constituant l'impluvium des aquifères karstiques, croisant l'identification des morphologies karstiques de surface avec leurs conditions de genèse et leur relation supposée avec les chemins de drainage karstiques de la zone vadose. Cette approche permet d'établir une typologie détaillée des modalités d'infiltration : infiltration concentrée rapide (pertes, ponors, avens), infiltration diffuse directe (zones lapiazées sans drainage de surface préalable), infiltration diffuse modérée (épikarst peu développé ou colmaté), et zones de faible infiltration sur substrat marneux ou couvertures insolubles.

Le Parc Naturel Régional de la Sainte-Baume a développé cette approche pour les systèmes de taille moyenne bien documentés (HYDROFIS, 2019, 2021 ; CENOTE, 2020). Cette méthodologie illustre le passage d'une cartographie d'expertise vers un zonage opérationnel applicable à la gestion territoriale.

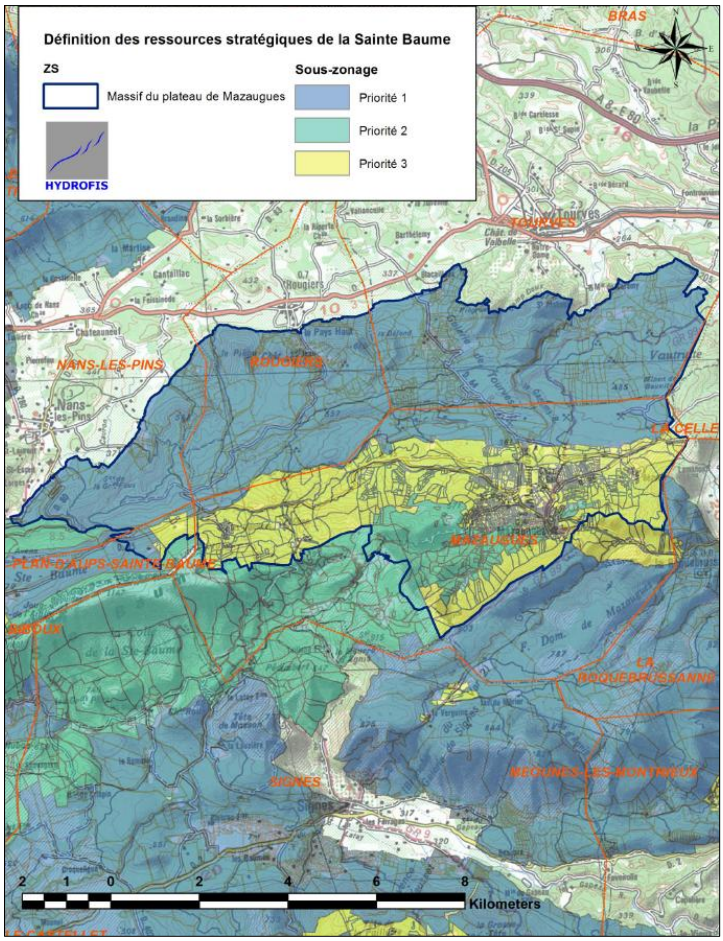


Figure 6 : Carte des modalités d'infiltration du plateau de Mazaugues - PNR Sainte-Baume

La délimitation en sous-zones résulte d'un diagnostic karstologique effectué à l'échelle du territoire du PNR, qui s'est traduit par une carte des modalités d'infiltration constituant un outil de synthèse des connaissances géomorphologiques et hydrogéologiques. Cette approche permet une traduction opérationnelle des processus karstiques complexes en zonages fonctionnels hiérarchisés.

Le zonage fonctionnel P1-P2-P3 distingue trois niveaux de protection adaptés aux caractéristiques locales. Les zones prioritaires (P1) correspondent aux secteurs à proximité des champs captants avec infiltration directe et migration rapide et non atténuée d'éventuelles pollutions. Ces zones, définies comme impluviums participant à l'alimentation directe des champs captants existants ou à venir, nécessitent une protection maximale car les contaminations ne seraient que peu ou pas atténuées.

Les zones de protection secondaire (P2) correspondent aux aquifères dits "annexes", en position lointaine par rapport aux champs captants, où les chemins de l'eau sont plus longs et où des effets de dilution et d'atténuation sont possibles. Cette classification reconnaît le rôle de la distance et des volumes de transit dans l'atténuation naturelle des contaminations.

Les zones de ruissellement (P3) se caractérisent par une prédominance des phénomènes de ruissellement sur les phénomènes d'infiltration, où l'alimentation des systèmes karstiques est indirecte via ruissellement puis infiltration. L'enjeu porte sur la maîtrise des exports indirects depuis les secteurs imperméables vers le karst.

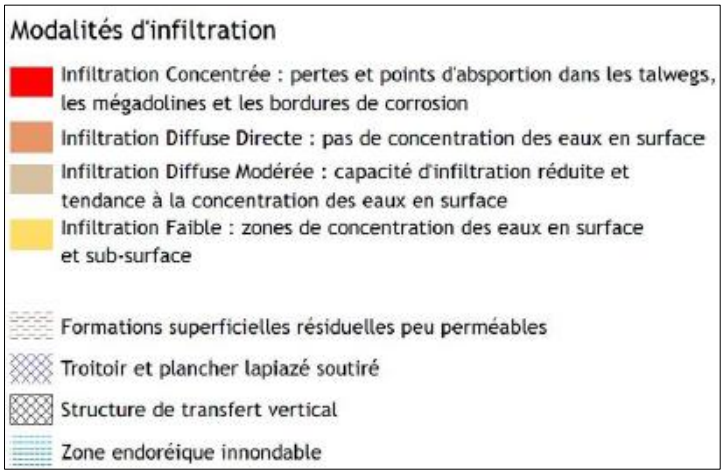


Figure 7 : Les modalités d'infiltration du secteur de la Sainte-Baume (CENOTE, 2020)

C. Évaluation des pressions anthropiques et combinaison multicritère

1. Utilisation de l'OCSGE et déclinaisons spécialisées

L'Occupation du Sol à Grande Échelle (OCSGE) constitue la base de données nationale de référence pour le suivi de l'artificialisation des sols. Dans le cadre des études de ressources stratégiques en contexte karstique, elle peut être mobilisée, moyennant une reclassification spécialisée, pour l'évaluation des pressions anthropiques sur les zones d'alimentation. Développée par l'IGN avec une résolution fine (Unité Minimale de Collecte de 200 à 2 500 m²), l'OCSGE offre une description détaillée de l'occupation du sol utilisable pour les bilans de

consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF), l'artificialisation et l'imperméabilisation. Son adaptation aux études de ressources stratégiques nécessite une reclassification spécialisée selon les niveaux de pression sur la qualité des eaux souterraines.

Le projet KARSYS Doubs (ISSKA, 2024) illustre une approche méthodologique pour l'évaluation des pressions anthropiques en contexte karstique, élaborée en concertation avec l'Agence de l'Eau RMC, l'EPTB Saône et Doubs, la DREAL BFC, des syndicats de rivière (EPAGE Haut-Doubs Haute-Loue, EPAGE Doubs-Dessoubre), des collectivités territoriales et la chambre d'agriculture 25/90. Cette approche présente l'avantage d'une applicabilité régionale et d'une reproductibilité territoriale.

La méthodologie s'appuie sur le jeu de données "Occupation du Sol à Grande échelle (OCS GE) de Bourgogne-Franche-Comté", élaboré par l'IGN et disponible sur la plateforme Idéo. Ces données, utilisables à l'échelle 1/50 000, analysent deux dimensions complémentaires : l'occupation du sol [CODE_CS] décrivant la couverture terrestre physique, et l'usage [CODE_US] caractérisant la fonction socio-économique. Les entités "Cultures annuelles" (US1.1.3) regroupant indifféremment zones de cultures et prairies d'élevage sont recatégorisées selon le Registre Parcellaire Graphique (RPG) qui distingue près de 200 types de cultures aux besoins contrastés en intrants (engrais, produits phytosanitaires).

L'utilisation de l'OCSGE pour les études de ressources stratégiques nécessite donc une reclassification spécialisée selon les niveaux de pression potentielle sur la qualité des eaux souterraines. Cette reclassification distingue cinq classes de pression (très faible, faible, modérée, forte, très forte) basées sur le potentiel polluant des différents types d'occupation du sol, adaptation qui sort du cadre d'usage initial de cette base de données.

Les déclinaisons spécialisées complètent cette approche par des inventaires détaillés des activités à risque. L'inventaire des installations classées (ICPE) permet d'identifier et de localiser précisément les sources industrielles potentielles de pollution. L'analyse des pratiques agricoles caractérise l'intensité d'utilisation des intrants (engrais, pesticides) selon les types de cultures et les modes d'exploitation.

Cependant, il convient de souligner que les pratiques agricoles et l'assolement évoluent significativement dans le temps, sous l'influence de facteurs économiques, climatiques et réglementaires. Une parcelle classée en prairie permanente lors de l'étude initiale peut être convertie en culture intensive quelques années plus tard, modifiant substantiellement le niveau de pression associé.

2. Adaptation aux spécificités karstiques

L'évaluation des pressions anthropiques en contexte karstique intègre les spécificités fonctionnelles de ces systèmes. La rapidité des transferts impose une évaluation spécifique des risques : des contaminations survenant à plusieurs kilomètres des exutoires peuvent atteindre les points de captage en quelques heures.

La variabilité temporelle de la vulnérabilité selon les conditions hydrologiques et les variations climatiques doit également être intégrée. En période de basses eaux, les connexions hydrauliques se limitent aux drains principaux et les temps de transfert sont plus longs. En

période de hautes eaux, l'activation de connexions hydrauliques temporaires et l'augmentation des vitesses d'écoulement accroissent considérablement la vulnérabilité du système.

Enseignements méthodologiques du projet KARSYS Doubs

L'expérience du Doubs souligne plusieurs adaptations spécifiques nécessaires pour les contextes karstiques :

Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale. La méthodologie intègre la diversité des modalités d'infiltration en croisant les informations de pression avec les cartes d'infiltrabilité dérivées de la Carte du Karst. Cette approche permet de pondérer les pressions selon la susceptibilité réelle des terrains à transmettre les contaminations vers l'aquifère.

Validation de l'applicabilité territoriale. L'approche développée dans le Doubs présente l'avantage d'être directement transposable à d'autres territoires karstiques utilisant les mêmes référentiels nationaux (OCSGE, RPG), tout en permettant des adaptations locales par la concertation multi-acteurs. Cette reproductibilité constitue un atout majeur pour l'harmonisation des pratiques à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée.

3. Méthode de croisement multicritère et hiérarchisation

La matrice infiltrabilité × pressions constitue l'outil central de hiérarchisation des zones de sauvegarde. Cette approche croise la susceptibilité à la contamination (cartes d'infiltrabilité) et les sources potentielles de pollution (cartes de pressions) pour produire une cartographie graduée du risque. Le projet KARSYS Doubs illustre parfaitement cette approche matricielle par la combinaison des paramètres d'infiltration et de pression selon une matrice produisant une carte de risque "contamination" selon 4 classes principales, avec une distinction supplémentaire pour la classe 2.

Infiltration\Pression	*Forte (3)*	*Modérée (2)*	*Faible (1)*
Concentrée (1)	4	3	2b
Diffuse directe (2)	3	2b	2a
Modérée (3)	2a	2a	1
Faible (4)	2a	1	1

Tableau 4 : Matrice de combinaison infiltration-pression (projet KARSYS Doubs)

La matrice de combinaison infiltration-pression présentée (Tableau 3) constitue un référentiel susceptible d’être ajusté. Les pondérations peuvent être modulées en fonction de plusieurs catégories de paramètres déterminants. Les caractéristiques hydrogéologiques locales influencent la sensibilité relative des systèmes : les aquifères à zone noyée peu développée justifient une pondération accrue du critère infiltration, tandis que les systèmes à forte capacité de dilution peuvent tolérer une atténuation du poids des pressions anthropiques. Les objectifs de gestion territoriale orientent également les ajustements : par exemple les territoires privilégiant une approche préventive maximale peuvent renforcer la sévérité de classification

(passage de Z2_2 à Z2_3 pour les zones à risques combinés modérés). Enfin, la qualité et la complétude des données disponibles conditionnent également le degré de finesse des classifications.

Application opérationnelle : l'exemple du Doubs

Le projet KARSYS Doubs illustre cette approche matricielle produisant une carte de risque selon 4 classes principales (1 = risque faible, 2 = risque faible à modéré, 3 = risque modéré à fort, 4 = risque fort), avec distinction supplémentaire pour la classe 2 (2a et 2b). La classe 2b constitue une "sous-zone de vigilance" : ces surfaces restent vulnérables à l'infiltration et un changement de pression peut significativement rehausser l'indice de risque. Cette granularité de classification permet une méthodologie adaptative particulièrement adaptée à la gestion territoriale, en identifiant non seulement les zones nécessitant une protection immédiate, mais également celles requérant une vigilance particulière en cas d'évolution des usages.

La hiérarchisation finale distingue trois catégories selon le niveau de risque. La Zone Z2_1 (risque faible) correspond à un aléa contamination limité et une protection naturelle significative, bénéficiant généralement d'une couverture quaternaire épaisse et d'une zone noyée développée. Ces systèmes présentent des volumes de transit importants favorisant la dilution des contaminations potentielles.

La Zone Z2_2 (risque modéré) constitue généralement la majorité du bassin d'alimentation, avec un aléa contamination modéré et une situation intermédiaire en termes de protection naturelle. La Zone Z2_3 (risque élevé) regroupe les secteurs nécessitant une protection renforcée et des outils réglementaires, caractérisés par un aléa contamination fort à très fort résultant de la combinaison d'une forte infiltrabilité et de pressions anthropiques significatives.

Perspectives d'amélioration méthodologique

L'expérience du Doubs identifie plusieurs pistes d'amélioration pour les futures applications :

Affinement de l'évaluation des pressions : La méthodologie utilisée pour l'évaluation des pressions reste relativement sommaire et pourrait être significativement améliorée sur la base d'une distinction plus fine du type de pression (nature supposée du polluant, intensité de la charge polluante, distribution spatiale). Cette amélioration nécessiterait un projet spécifique en concertation avec les autorités compétentes car les implications en termes d'interprétation sont conséquentes.

Intégration de la variabilité temporelle : Les évaluations actuelles restent statiques et ne prennent pas en compte les variations saisonnières des pressions (périodes d'épandage, variations d'activité industrielle) ni les évolutions temporelles des pratiques agricoles. L'intégration de cette dimension temporelle constitue une perspective d'amélioration importante pour affiner les évaluations de risque.

Développement d'indicateurs de suivi : La mise en place d'indicateurs permettant de suivre l'évolution des pressions dans le temps et d'évaluer l'efficacité des mesures de protection constitue un enjeu majeur pour la gestion adaptative des zones de sauvegarde.

Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque pour l'aménagement du territoire

L'utilisation des zonages en termes de préconisations pour un aménagement du territoire compatible avec une préservation durable de la ressource nécessite de travailler également avec des cartes de vulnérabilité intrinsèque (infiltrabilité) indépendantes des pressions anthropiques actuelles. En effet, les zonages basés uniquement sur le croisement infiltrabilité × pressions reflètent l'état actuel du risque mais ne permettent pas d'anticiper l'impact de nouveaux aménagements.

La cartographie de la vulnérabilité intrinsèque seule constitue un outil complémentaire essentiel pour :

- Guider l'implantation de nouveaux projets d'aménagement
- Définir des règles d'urbanisme préventives dans les PLU
- Identifier les zones où toute intensification des activités serait problématique

Cette double approche (risque actuel ET vulnérabilité intrinsèque) assure une gestion durable à long terme des zones de sauvegarde. Pour les applications en aménagement du territoire visant une préservation durable, il est recommandé de pondérer différemment les critères en donnant un poids plus important à la vulnérabilité intrinsèque qu'aux pressions actuelles, ces dernières étant par nature évolutives dans le temps. Les méthodologies présentées dans ce chapitre (Zones 1 et 2, hiérarchisation multicritère) constituent une boîte à outils diversifiée pour la délimitation des zones de sauvegarde. Le choix et la combinaison de ces méthodes dépendent de trois dimensions fondamentales : la complexité hydrogéologique du système, les enjeux et moyens disponibles, et la complétude des données existantes. L'arbre décisionnel ci-après (figure 8 et annexe 2) synthétise les principales combinaisons possibles et oriente le dimensionnement méthodologique en fonction du contexte territorial spécifique.

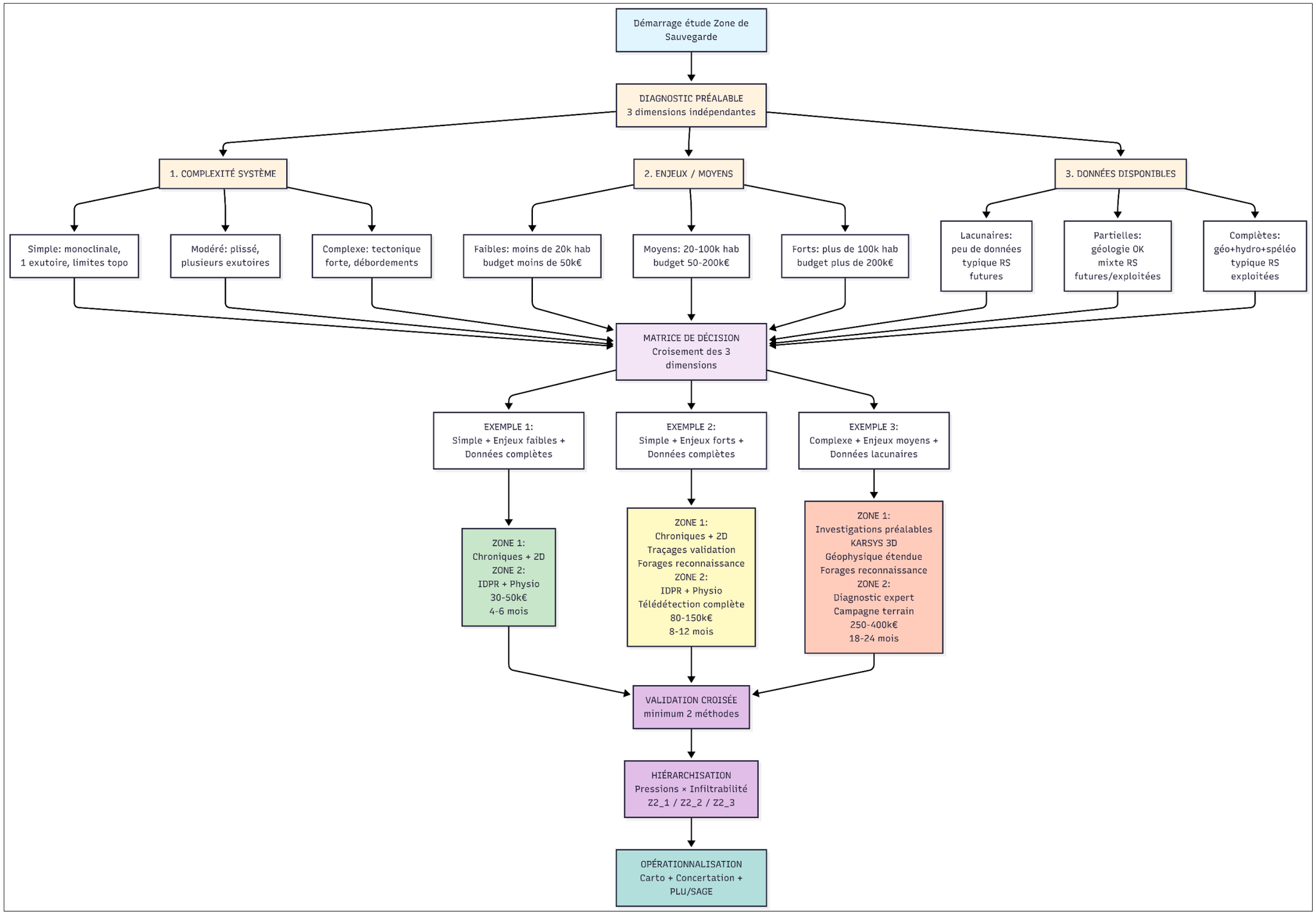


Figure 8 : Arbre Décisionnel : Méthodologie de Délimitation des Zones de Sauvegarde

IV. Aide à la décision méthodologique et mise en œuvre opérationnelle

Cette approche complète les méthodologies générales présentées dans le guide AERMC 2021 (chapitre 4) en développant les outils d'aide à la décision et les aspects opérationnels spécifiquement adaptés aux contextes karstiques. Ce chapitre constitue le guide pratique pour choisir et mettre en œuvre les approches les mieux adaptées aux contraintes locales.

L'analyse des démarches de délimitation conduites sur le bassin Rhône-Méditerranée depuis 2010 révèle une diversité d'approches méthodologiques et organisationnelles qui reflète à la fois la variété des contextes karstiques et l'évolution des pratiques techniques. Ces retours d'expérience constituent un référentiel précieux pour orienter les choix méthodologiques et anticiper les écueils récurrents.

La compilation de douze études représentatives illustre les trajectoires contrastées selon les choix méthodologiques initiaux, les moyens mobilisés et les modalités de gouvernance adoptées. Certaines démarches, initialement ambitieuses mais mal dimensionnées, ont dû être réorientées en cours d'étude, générant des surcoûts et des retards significatifs. À l'inverse, des approches pragmatiques bien calibrées ont démontré qu'une méthodologie adaptée au contexte local peut produire des résultats opérationnels durables à coûts maîtrisés.

L'analyse révèle trois variables déterminantes pour la réussite des démarches : l'adéquation entre complexité du système et sophistication méthodologique, la qualité de la concertation territoriale préalable, et la disponibilité d'un accompagnement technique spécialisé. Les échecs méthodologiques résultent généralement de la sous-estimation de l'une de ces trois dimensions, tandis que les réussites se caractérisent par une approche équilibrée intégrant ces trois facteurs dès la conception des études.

Le tableau suivant synthétise les principales caractéristiques et enseignements de ces expériences territoriales, constituant une grille d'analyse comparative pour le dimensionnement de nouvelles démarches.

Territoire	Approche méthodologique	Avantages	Limites	Applicabilité	Coût
Doubs	Combinaison infiltrabilité + pressions + modélisation 3D KARSYS	Robustesse scientifique, reproductibilité, différenciation spatiale fine	Coût et complexité de mise en œuvre, expertise spécialisée	Systèmes karstiques complexes, enjeux majeurs	Élevé
Minervois (Pouzols)	Analyse multicritère standard + délimitation zones production/alimentation	Différenciation ZSE/ZSNEA, intégration vulnérabilité intrinsèque	Approche empirique, modélisation 3D limitée	Aquifères karstiques moins complexes	Modéré
PNR Sainte-Baume	Diagnostic karstologique expert + classification vulnérabilité CENOTE	Expertise terrain, adaptation contexte local, finesse analyse	Subjectivité, difficulté de standardisation	Petits systèmes bien documentés	Élevé
Vercors	Évaluation multicritères + concertation structurée + fiches-actions	Intégration critères socio-économiques, acceptabilité sociale	Complexité organisationnelle, temps de mise en œuvre	Contexte multi-acteurs, enjeux gouvernance	Modéré
Département Hérault	Analyse multicritère standard + périmètres existants	Simplicité, compatibilité réglementaire, rapidité	Faible différenciation, peu d'amélioration méthodologique	Gestion administrative rapide	Faible
Bassin Ardèche	Hiérarchisation multicritère + critères socio-économiques	Intégration acceptabilité territoriale, stratégie progressive en 4 niveaux, gouvernance SAGE, approche graduée	Modélisation 3D limitée aux investigations ponctuelles	Contexte multi-aquifères hétérogènes	Modéré

Tableau 5 : Comparaison des approches territoriales

A. Diagnostic préalable du contexte

Le diagnostic préalable caractérise le contexte d'intervention et oriente les choix méthodologiques avant toute démarche de délimitation. Cette phase permet d'éviter les erreurs d'appréciation coûteuses et d'optimiser l'allocation des moyens disponibles.

Évaluation de la complexité du système

La complexité hydrogéologique du système karstique étudié détermine le choix méthodologique prioritairement. Les systèmes karstiques simples se caractérisent par des formations carbonatées homogènes associées à des structures géologiques peu complexes, généralement monoclinales ou faiblement plissées. Leur fonctionnement hydrodynamique présente une relative unité avec un exutoire principal bien identifié et un régime hydrologique régulier. Les bassins d'alimentation correspondent généralement aux limites topographiques, simplifiant considérablement leur délimitation.

Les systèmes de complexité modérée présentent des formations carbonatées avec intercalations marneuses et des structures géologiques plissées modérément complexes. Leur fonctionnement hydrodynamique implique plusieurs exutoires avec une hiérarchisation variable selon les conditions hydrologiques saisonnières. Les bassins d'alimentation peuvent présenter des débordements souterrains limités et quelques connexions intersystémiques qui complexifient leur délimitation.

Les systèmes complexes se distinguent par des formations géologiques hétérogènes associées à des structures tectoniques complexes incluant des chevauchements et des systèmes de failles majeures. Leur fonctionnement hydrodynamique présente une forte variabilité selon les conditions hydrologiques, avec des débordements souterrains importants et des connexions hydrauliques multiples. Ces systèmes peuvent présenter un caractère binaire ou ternaire avec des contributions d'aquifères non carbonatés via des pertes de cours d'eau.

Inventaire des données disponibles

L'inventaire systématique des données disponibles conditionne les choix méthodologiques et identifie les investigations complémentaires indispensables. Les données géologiques et structurales constituent la base fondamentale de toute approche méthodologique en milieu karstique. La disponibilité de cartes géologiques détaillées à l'échelle du 1/50 000 ou plus fine conditionne la possibilité d'appliquer des approches de modélisation géologique. Les coupes géologiques et logs de forages existants apportent une vision tridimensionnelle indispensable pour comprendre l'architecture souterraine.

Les données hydrogéologiques déterminent la possibilité d'appliquer des méthodes d'analyse quantitative du fonctionnement des systèmes. Les chroniques piézométriques et de débits aux exutoires, idéalement sur une durée minimale de trois ans, permettent de caractériser la variabilité temporelle du fonctionnement et d'appliquer des méthodes d'analyse systémique. Les traçages artificiels antérieurs constituent une source d'information particulièrement précieuse sur les connexions hydrauliques et les vitesses de transfert. La disponibilité et la qualité des données diffèrent significativement selon qu'il s'agit de ressources stratégiques exploitées ou non exploitées actuellement. Les ressources stratégiques exploitées bénéficient généralement de chroniques de production, d'analyses qualitatives régulières et de connaissances accumulées lors de l'exploitation. À l'inverse, les ressources stratégiques non exploitées disposent souvent de données limitées nécessitant des investigations spécifiques plus importantes pour caractériser leur potentiel quantitatif et qualitatif. Cette différence doit être prise en compte dans le dimensionnement budgétaire et temporel des études.

Les données spéléologiques et karstologiques[1] fournissent une source d'information souvent sous-valorisée mais particulièrement riche pour la compréhension des systèmes karstiques. L'inventaire des cavités naturelles et les topographies souterraines disponibles apportent une vision directe de l'architecture des réseaux de drainage. Les connaissances empiriques accumulées par les spéléologues locaux sur plusieurs décennies d'exploration représentent un patrimoine informationnel unique qui mérite d'être systématiquement consulté et valorisé.

[1] Les principales bases de données mobilisables incluent notamment : BD Cavités (BRGM) et les bases spéléométriques régionales gérées par les fédérations ou comités départementaux de spéléologie.

Les données LIDAR haute résolution, lorsqu'elles sont disponibles, constituent un apport majeur pour l'identification des morphologies karstiques de surface et la caractérisation fine de la microtopographie.

Évaluation des moyens disponibles

L'évaluation des moyens disponibles détermine le dimensionnement de l'étude et le choix méthodologique. Cette évaluation intègre les dimensions financières, techniques et temporelles pour un projet réaliste adapté aux conditions locales.

L'évaluation des moyens financiers doit distinguer le budget global disponible et sa répartition entre les différentes phases. Les capacités de financement et les sources de subventions mobilisables influencent directement l'ambition méthodologique.

L'évaluation des moyens techniques porte sur les compétences internes disponibles et la capacité d'encadrement technique des prestataires. L'expertise des bureaux d'études locaux spécialisés en karst constitue un facteur critique, le marché de l'expertise karstique étant relativement restreint et concentré sur quelques acteurs spécialisés. L'accès aux outils de modélisation spécialisés, notamment la plateforme Visual KARSYS, peut nécessiter des partenariats techniques spécifiques.

Les contraintes temporelles doivent intégrer les délais imposés par la planification territoriale, notamment les échéances de révision des PLU ou des SAGE. Les temps de concertation nécessaires avec les acteurs locaux, particulièrement importants en contexte karstique où les bassins d'alimentation dépassent souvent les limites administratives, doivent être intégrés dès la phase de planification.

B. Orientations méthodologiques par contexte

Les choix méthodologiques s'adaptent au contexte spécifique de chaque territoire selon la complexité du système, les moyens disponibles et les enjeux identifiés. Cette approche différenciée privilégie des combinaisons méthodologiques contextuelles plutôt qu'une solution unique.

Systèmes simples

Pour les systèmes karstiques simples, quelle que soit la taille de la collectivité maître d'ouvrage, avec des budgets inférieurs à 50 000 euros, l'approche recommandée privilégie les méthodes standardisées s'appuyant sur les données nationales disponibles. L'analyse des chroniques de sources, lorsqu'elles existent, permet une première caractérisation du fonctionnement du système à coût maîtrisé. La modélisation bidimensionnelle conventionnelle, basée sur les cartes géologiques existantes, constitue une approche accessible pour délimiter les zones de production.

Pour les zones d'alimentation, la combinaison de la méthode IDPR et de la carte du karst ISSKA offre une approche standardisée efficace. Cette combinaison s'appuie sur des données nationales homogènes et une méthodologie éprouvée, permettant d'obtenir une première délimitation opérationnelle. L'optimisation de l'utilisation des ressources disponibles passe par l'exploitation prioritaire de l'expertise locale, notamment les connaissances spéléologiques qui peuvent considérablement faciliter la compréhension des systèmes.

Systèmes de complexité modérée

Les systèmes de complexité modérée, indépendamment de la taille de la collectivité, nécessitent généralement des budgets de 50 000 à 150 000 euros. La stratégie associe des méthodes multicritères et des investigations complémentaires ciblées. Les méthodes multicritères permettent une première évaluation de la productivité des aquifères karstiques, validée par des investigations géophysiques pour la caractérisation structurale.

Les zones d'alimentation bénéficient d'approches de télédétection couplées à des méthodes multicritères, permettant une cartographie fine des modalités d'infiltration. Cette combinaison optimise l'efficacité en mobilisant les technologies de pointe tout en conservant une approche économiquement viable. La validation s'appuie sur des traçages ciblés permettant de confirmer les connexions hydrauliques principales identifiées.

L'adaptation selon les données disponibles constitue un facteur critique de réussite des études. Les territoires disposant de données complètes dans les trois domaines géologie, hydrologie et spéléologie peuvent appliquer directement les méthodologies sans investigations préalables importantes. À l'inverse, les lacunes dans certains domaines justifient des surcoûts d'environ 20 à 30% pour compenser par des investigations complémentaires.

Systèmes complexes

Les systèmes complexes justifient systématiquement le recours aux méthodes les plus sophistiquées, indépendamment de la taille de la collectivité, une petite collectivité peut se trouver face à un système hydrogéologiquement complexe, tout comme une grande agglomération peut n'avoir besoin que d'un complément méthodologique ciblé pour sécuriser son approvisionnement. L'approche recommandée mobilise la modélisation tridimensionnelle KARSYS couplée à des traçages complets pour la délimitation des zones de production.

Cette combinaison permet d'appréhender la complexité tridimensionnelle de l'architecture hydrogéologique tout en validant les connexions hydrauliques critiques par des investigations de terrain. L'exemple du Dessoubre illustre parfaitement l'importance de cette approche sophistiquée, avec une révision majeure du bassin d'alimentation réévalué à 197 km² contre 123 km² estimés par des approches empiriques, soit une augmentation de 60% de la surface de la ressource stratégique.

Les zones d'alimentation bénéficient d'un diagnostic karstologique expert couplé à une validation terrain approfondie. Cette approche, illustrée par la méthodologie CENOTE développée au Parc Sainte-Baume, permet d'obtenir une expertise terrain irremplaçable et une finesse d'analyse remarquable des modalités d'infiltration.

Cas particuliers et adaptations

Les syndicats intercommunaux présentent un profil particulier caractérisé par des moyens intermédiaires mais des délais plus étendus liés aux contraintes de gouvernance multi-collectivités. L'approche recommandée privilégie une démarche adaptative progressive permettant d'ajuster la méthodologie selon les premiers résultats obtenus. Cette flexibilité méthodologique compense les incertitudes initiales sur la complexité réelle des systèmes.

Les territoires moins bien documentés doivent s'appuyer prioritairement sur les données nationales disponibles et les approches géomatiques. La disponibilité de données LIDAR

constitue un atout majeur pour l'identification des objets karstiques de surface et peut justifier le recours à des approches de télédétection avancées. En l'absence de données spécialisées, l'approche IDPR couplée à la carte du karst ISSKA constitue l'approche standard recommandée.

C. Dimensions financières et optimisation

La mise en œuvre effective des stratégies de délimitation nécessite une approche réaliste des aspects financiers et une optimisation des moyens disponibles. Cette dimension économique conditionne largement la faisabilité des démarches et leur pérennité.

Ordres de grandeur des coûts

Les ordres de grandeur présentés correspondent aux coûts par ressource stratégique étudiée. Dans la pratique, les grandes collectivités étudient souvent plusieurs ressources stratégiques simultanément, ce qui permet de mutualiser les coûts (compilation des données régionales, approches méthodologiques communes, économies d'échelle sur les campagnes terrain). Cette mutualisation peut générer des économies substantielles par ressource par rapport à des études séparées. Le nombre de ressources stratégiques à étudier est généralement corrélé à la taille de la collectivité et à la diversité de ses sources d'approvisionnement.

L'évaluation des coûts des études de délimitation doit intégrer l'ensemble des postes depuis les études préliminaires jusqu'à la production cartographique finale. Les systèmes de complexité simple nécessitent généralement des budgets de 30 000 à 80 000 euros, incluant la compilation des données existantes, l'application des méthodes de délimitation standardisées, et la production cartographique finale.

Les systèmes de complexité modérée requièrent des budgets de 80 000 à 200 000 euros en intégrant des investigations complémentaires ciblées. Les investigations géophysiques, les traçages artificiels et les approches de télédétection représentent les principaux postes d'investissement complémentaire, avec des coûts variables selon l'étendue des territoires étudiés et la précision requise.

Les systèmes complexes nécessitent des budgets de 200 000 à 500 000 euros en mobilisant les approches les plus sophistiquées. La modélisation tridimensionnelle KARSYS, le diagnostic karstologique expert et les campagnes de traçages multiples constituent les principales composantes de ces budgets élevés, justifiés par l'importance des enjeux de sécurisation de l'approvisionnement.

Couts des investigations par forages

Les investigations par forages de reconnaissance constituent un poste budgétaire significatif dans les démarches de connaissance. Ces investigations s'imposent lorsque la connaissance de la géométrie tridimensionnelle des zones de production nécessite une validation directe, ou lorsque l'objectif inclut l'identification de nouvelles ressources exploitables. Le coût des investigations complémentaires peut être largement conditionné par le nombre de forages de reconnaissance et leur profondeur. Les coûts unitaires se situent généralement entre 300 et 600 €/m selon :

- Le contexte géologique (formations plus ou moins dures)

- Les contraintes d'accès au terrain
- L'équipement du forage (piézomètre, tubage, etc.)
- Les essais géophysiques en forage

À titre d'exemple, un forage de 150 m de profondeur représente un coût de 45 000 à 90 000 €, auxquels s'ajoutent les coûts de pompage d'essai (10 000 à 20 000 € selon la durée). Pour les systèmes complexes, une campagne de 3 à 5 forages de reconnaissance peut ainsi représenter 150 000 à 400 000 €, soit potentiellement plus de 50% du budget total d'étude.

Dans ce contexte, une campagne géophysique préalable représente un investissement souvent rentable. Les coûts varient sensiblement selon les méthodes mobilisées : les méthodes électromagnétiques (VLF, EM31, EM34) constituent l'option la plus économique (5 000 à 15 000 € pour une campagne de reconnaissance), la tomographie de résistivité électrique représente un investissement intermédiaire (15 000 à 35 000 € selon le nombre de profils et leur longueur), tandis que la sismique réflexion et le radar géologique (GPR) mobilisent des moyens plus lourds (30 000 à 60 000 €). En guidant l'implantation des forages vers les zones de plus forte karstification ou fracturation, même la méthode la plus coûteuse reste largement inférieure au coût d'un seul forage négatif (45 000 à 90 000 €). Pour les systèmes de complexité modérée à forte, et a fortiori lorsque plusieurs forages sont envisagés, le ratio coût/bénéfice d'une reconnaissance géophysique préalable est donc généralement favorable[2].

Facteurs influençant les coûts

Les coûts réels des études dépendent de quatre facteurs principaux : la superficie du bassin d'alimentation (impact direct sur prospections terrain), la complexité géologique et structurale (nombre d'investigations complémentaires), la disponibilité des données existantes (économies substantielles ou surcoûts d'acquisition), et les conditions d'accès au terrain (surcoûts logistiques en zones montagnardes ou forestières)

Stratégies d'optimisation budgétaire

Les ordres de grandeur présentés correspondent aux coûts par ressource stratégique étudiée. Dans la pratique, les grandes collectivités étudient souvent plusieurs ressources stratégiques simultanément, ce qui permet de mutualiser les coûts et d'optimiser les investissements méthodologiques. Cette mutualisation opère à différents niveaux.

Mutualisation des phases préliminaires : la compilation des données régionales (cartes géologiques, données spéléologiques, synthèses hydrogéologiques existantes), l'analyse du contexte structural et la définition du cadre méthodologique général constituent des investissements partagés entre plusieurs ressources d'un même territoire. Cette phase représente typiquement 15 à 25% du budget total d'une étude.

Économies d'échelle sur les campagnes terrain : les interventions géophysiques, les campagnes de traçages artificiels et les levés topographiques peuvent être regroupées lorsque plusieurs ressources sont géographiquement proches, générant des économies de 20 à 30% par ressource

[2] Comme pour le §3, les fourchettes de prix présentées dans ce paragraphe sont données à titre indicatif : les coûts réels peuvent varier significativement selon les conditions d'accès au terrain, la topographie, la superficie à couvrir, la disponibilité du matériel spécialisé et le contexte concurrentiel local.

par rapport à des études séparées. La mobilisation unique du matériel et des équipes spécialisées optimise significativement les coûts logistiques.

Partage des outils de modélisation : le développement d'une plateforme de modélisation géologique 3D (type KARSYS) ou la mise en place d'une base de données hydrogéologique régionale bénéficie à l'ensemble des ressources étudiées sur un territoire donné, amortissant l'investissement initial sur plusieurs projets.

Le nombre de ressources stratégiques à étudier est généralement corrélé à la taille de la collectivité et à la diversité de ses sources d'approvisionnement. Une petite collectivité (moins de 20 000 habitants) dispose typiquement d'une à deux ressources stratégiques, tandis qu'une grande agglomération (plus de 100 000 habitants) peut en comptabiliser cinq à dix, justifiant pleinement une approche mutualisée. Cette mutualisation peut conduire à un coût unitaire par ressource inférieur de 25 à 35% par rapport à des études isolées, tout en garantissant une cohérence méthodologique à l'échelle du territoire.

Sources de financement spécialisées

Au-delà des subventions de l'Agence de l'Eau, plusieurs dispositifs spécialisés peuvent être mobilisés selon les contextes territoriaux. Les programmes européens LIFE+ offrent des opportunités de financement particulièrement attractives pour les projets innovants, pouvant financer jusqu'à 60% des coûts éligibles.

Les programmes Interreg constituent une source de financement européenne particulièrement adaptée aux systèmes karstiques transfrontaliers, pouvant financer jusqu'à 85% des coûts de projets de coopération territoriale.

D’autres partenaires peuvent participer sous conditions au co-financement des études de ressources stratégiques : les Parcs Naturels Régionaux (PNR) dans le cadre de leurs missions de gestion des ressources naturelles, les Conseils Départementaux via leurs politiques de soutien aux collectivités, et les Régions pour les projets s'inscrivant dans leurs schémas d'aménagement.

Les mécanismes innovants tels que les paiements pour services environnementaux ou les mécanismes de compensation environnementale représentent des sources de financement émergentes. Ces dispositifs, orientés vers le financement des changements de pratiques agricoles plutôt que des études de délimitation, peuvent néanmoins contribuer indirectement à la préservation de la qualité de l'eau sur les bassins d'alimentation.

D. Validation et contrôle qualité

Le contrôle qualité méthodologique assure la robustesse technique et la cohérence des résultats obtenus. Cette approche de contrôle qualité synthétise les critères de validation développés par l'expérience des différents territoires et constitue un référentiel de bonnes pratiques.

Critères de robustesse technique

La validation scientifique assure la cohérence entre méthodologie et complexité réelle du système. Une approche sous-dimensionnée compromet la fiabilité, une approche surdimensionnée génère des surcoûts et réduit l'acceptabilité. L'utilisation de données récentes conditionne la pertinence des analyses.

La validation croisée par au moins deux approches indépendantes permet de s'assurer de la convergence des résultats et d'identifier d'éventuelles incohérences. Cette validation croisée garantit la robustesse pour les systèmes complexes où les incertitudes méthodologiques sont plus importantes. La prise en compte explicite de l'incertitude et des limites méthodologiques contribue à la crédibilité scientifique des études.

La documentation technique doit assurer une traçabilité complète des données utilisées et de leur traitement, permettant la reproduction des analyses et la vérification des résultats par des tiers. La cartographie à échelle appropriée conditionne l'utilisabilité opérationnelle des résultats.

Points de vigilance spécifiques au karst

La compréhension du système karstique nécessite une identification correcte du type de fonctionnement, qu'il soit simple, binaire ou complexe. Cette typologie conditionne l'ensemble de l'approche méthodologique et constitue souvent l'élément discriminant entre une étude de qualité et une approche inadaptée. La prise en compte de la dualité de fonctionnement caractéristique des aquifères karstiques, associant composante capacitive de stockage et composante transmissive de drainage, constitue un prérequis fondamental.

L'évaluation de la variabilité temporelle du fonctionnement nécessite l'analyse de chroniques suffisamment longues pour caractériser les différents régimes hydrologiques. Cette variabilité temporelle, particulièrement importante en contexte karstique, influence directement les modalités de délimitation et les stratégies de protection à mettre en œuvre.

L'intégration des connexions surface-souterrain non évidentes, notamment les pertes de cours d'eau et les débordements souterrains, constitue souvent l'élément discriminant entre une étude médiocre et une étude de qualité. Ces connexions, caractéristiques des systèmes binaires, nécessitent de dépasser les approches géologiques conventionnelles centrées sur les seuls affleurements carbonatés.

Traçages artificiels : validation directe des connexions hydrauliques

Les traçages artificiels constituent l'outil de référence pour la validation des hypothèses de connexion hydraulique issues des méthodes indirectes de délimitation. Leur mise en œuvre répond à une logique d'optimisation, en concentrant les investigations sur les zones d'incertitude identifiées lors des phases préliminaires de délimitation.

La décision de mise en œuvre d'une campagne de traçage s'appuie sur trois critères décisionnels interdépendants. Le premier concerne l'incertitude résiduelle sur les connexions hydrauliques critiques **:** bassins contributifs mal contraints par les approches géologiques, suspicions de débordements souterrains non élucidés, pertes de cours d'eau dont le devenir souterrain reste indéterminé (Goldscheider et Drew, 2007). Cette incertitude se manifeste typiquement lorsque les limites topographiques et géologiques divergent significativement, ou lorsque l'architecture structurale suggère des transferts latéraux complexes non confirmés par les données existantes. Le deuxième critère porte sur la divergence entre méthodes de délimitation **:** lorsque les approches KARSYS, multicritères et expertise terrain produisent des délimitations contradictoires, la validation par traçage s'impose pour arbitrer entre hypothèses concurrentes. Cette situation survient fréquemment dans les systèmes à géologie complexe où les modèles conceptuels peuvent légitimement différer selon les données privilégiées. Le troisième critère s'articule autour de l'importance stratégique de la ressource **:** les ressources majeures justifient

une validation systématique par traçages, indépendamment du niveau d'incertitude apparent. Cette approche préventive se justifie par les enjeux de sécurisation de l'approvisionnement et les conséquences potentielles d'une délimitation sous-dimensionnée.

Les traçages artificiels s'intègrent dans une démarche de validation progressive structurée en phases complémentaires (cf. Figure 8, p.25). La délimitation préliminaire s'appuie sur les méthodes indirectes proportionnées à la complexité hydrogéologique documentée, produisant un premier zonage assorti d'une évaluation du niveau de confiance spatiale. L'analyse critique de cette délimitation identifie les secteurs présentant des incertitudes significatives (limites de bassins en zones de gradient piézométrique, pertes de cours d'eau à devenir indéterminé, suspicions de débordements souterrains), qui constituent les cibles prioritaires pour les investigations par traçages. Les campagnes sont dimensionnées selon une logique d'optimisation coût-efficacité, en concentrant les points d'injection sur les connexions critiques dont la validation modifie les délimitations. L'interprétation quantitative des courbes de restitution (temps de transit, taux de récupération, morphologie) permet d'ajuster les zonages préliminaires par confrontation avec les hypothèses de fonctionnement issues de la modélisation géologique ou tridimensionnelle. Cette validation croisée systématique constitue un gage de robustesse méthodologique, important pour les systèmes complexes où les délimitations basées sur la seule géologie peuvent sous-estimer les bassins d'alimentation réels.

Les protocoles détaillés (sélection des traceurs selon conditions hydrologiques, calculs de dosage, stratégies de détection optimales, protocoles réglementaires) sont développés dans les ouvrages de référence (Käss, 1998 ; Goldscheider et Drew, 2007 ; Benischke et al., 2007 ; Leibundgut et al., 2009) et ne sont pas redétaillés dans cette note d'accompagnement.

Indicateurs de cohérence des résultats

La cohérence hydrogéologique des résultats peut être évaluée par plusieurs indicateurs quantitatifs et qualitatifs. La compatibilité des volumes délimités avec la productivité observée aux exutoires constitue un test de cohérence fondamental souvent négligé. Cette compatibilité permet de valider la vraisemblance des délimitations proposées et d'identifier d'éventuelles incohérences majeures.

La cohérence territoriale des résultats conditionne leur appropriation par les acteurs locaux et leur traduction opérationnelle. L'acceptabilité sociale des délimitations proposées, évaluée par la concertation avec les acteurs locaux, constitue un facteur critique de succès des démarches. La faisabilité technique et économique des mesures de protection doit être évaluée dès la phase d'étude pour éviter des propositions inapplicables.

Cette validation systématique, proportionnée au niveau d'enjeu et à la complexité, élève la qualité des études de ressources stratégiques et facilite leur appropriation par les acteurs concernés. Elle fournit également un référentiel partagé pour les échanges territoriaux et la capitalisation d'expérience.

Cohérence temporelle et adaptative

La cohérence des délimitations doit également être évaluée dans une perspective temporelle par des dispositifs de suivi permettant de détecter les évolutions susceptibles de modifier substantiellement les zonages établis. La réévaluation périodique quinquennale ou décennale actualise les cartographies d'occupation du sol (OCSGE, RPG) et identifie les modifications

des pressions anthropiques impactant les classifications de risque. Plusieurs déclencheurs justifient une réévaluation exceptionnelle anticipée : par exemple incidents de contamination révélant des connexions hydrauliques insoupçonnées, mutations majeures d'usage du sol, ou évolutions significatives des régimes hydrologiques attestant d'une réponse climatique divergente des projections initiales. Cette approche adaptative reconnaît que les zones de sauvegarde constituent des outils de gestion dynamique dont la cohérence s'évalue dans la durée, permettant d'ajuster progressivement les stratégies de protection selon les retours d'expérience territoriaux et l'évolution des contextes hydroclimatiques.

Suites à donner

La présente note méthodologique constitue un référentiel de connaissances et de pratiques. Elle nécessite un accompagnement structuré pour permettre son appropriation effective par l'ensemble des acteurs territoriaux. Cet accompagnement doit garantir sa traduction dans les cahiers des charges puis de manière plus opérationnelle sur le terrain. Les suites à donner s'organisent selon trois axes complémentaires : la diffusion et l'appropriation du référentiel, le développement d'outils d'accompagnement opérationnels, et la capitalisation continue des retours d'expérience.

Le référentiel méthodologique développé dans cette note doit évoluer dans le temps. Il intégrera progressivement les retours d'expérience des territoires et les innovations méthodologiques. Un comité de suivi assurera le pilotage de cette démarche d'amélioration continue. Ce comité associera l'Agence de l'Eau RMC, les DREAL, l’ASCOAMDE, le Pôle Karst et des représentants des territoires pilotes.

Conclusion

Apports méthodologiques et facteurs de réussite

La délimitation des zones de sauvegarde associées aux ressources stratégiques karstiques répond à un défi méthodologique et opérationnel majeur pour la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable sur le bassin Rhône-Méditerranée doublée d'une obligation réglementaire sur un périmètre de SAGE. Cette note d'accompagnement apporte des contributions significatives à la pratique opérationnelle de ces études spécialisées.

L'analyse comparative des approches territoriales documentées révèle des niveaux d'efficacité variables selon les contextes d'application. L'approche combinée développée dans le Doubs, associant infiltrabilité, pressions et modélisation 3D KARSYS, démontre une robustesse scientifique élevée mais nécessite des moyens techniques et financiers importants. L'expérience du Dessoubre illustre l'importance de la sophistication méthodologique pour les systèmes complexes : révision du bassin d'alimentation de 123 km² (approches empiriques) à 197 km² (modélisation KARSYS), soit +60%.

Trois facteurs déterminants conditionnent l'efficacité des démarches au-delà des seuls aspects méthodologiques. La robustesse technique, proportionnée aux enjeux et moyens disponibles, fonde la crédibilité méthodologique. L'acceptabilité sociale, construite par concertation précoce adaptée aux spécificités karstiques, représente le second facteur critique. Cette acceptabilité nécessite un effort pédagogique important pour expliquer les spécificités contre-intuitives des milieux karstiques aux acteurs locaux. L'accompagnement financier et technique des territoires constitue le troisième pilier indispensable, particulièrement dans un contexte de ressources contraintes des collectivités locales.

Enjeux de gouvernance et mise en œuvre territoriale

Les bassins d'alimentation karstiques, dépassant fréquemment les limites administratives, nécessitent des modèles de gouvernance adaptés. Les syndicats mixtes de bassin versant constituent le modèle de référence le plus abouti pour la gestion intégrée des ressources karstiques à l'échelle de bassins étendus. Ces structures permettent d'associer l'ensemble des collectivités concernées dans une démarche de solidarité territoriale adaptée aux réalités hydrogéologiques.

La mise en œuvre effective des stratégies de protection nécessite une adaptation fine aux spécificités territoriales. Les systèmes péri-urbains font face à des pressions d'urbanisation croissantes nécessitant une approche préventive privilégiant la maîtrise de l'étalement urbain. Les systèmes ruraux concentrent les enjeux sur l'évolution des pratiques agricoles, principale source de pression diffuse sur la qualité des eaux souterraines. Les systèmes montagnards présentent des enjeux spécifiques liés à la gestion forestière et aux activités récréatives.

Les dispositifs de financement concilient efficacité économique, équité territoriale et acceptabilité sociale. Les bassins d'alimentation karstiques génèrent souvent des déséquilibres territoriaux importants entre les collectivités rurales supportant les contraintes de protection et les collectivités urbaines bénéficiant de la ressource. Cette situation nécessite le développement de mécanismes de péréquation adaptés et d'instruments économiques innovants tels que les paiements pour services environnementaux.

Perspectives d'évolution et innovations méthodologiques

Les évolutions technologiques en cours ouvrent des perspectives importantes d'amélioration de l'efficacité et de réduction des coûts des méthodologies de délimitation. L'approche KARSYS développée par l'ISSKA illustre ces évolutions par sa capacité à traiter systématiquement la complexité tridimensionnelle des systèmes karstiques. La démocratisation progressive de ces outils sophistiqués devrait permettre leur application élargie aux systèmes de complexité modérée.

L'amélioration continue de la plateforme Visual KARSYS, avec notamment l'intégration de modules analytiques et l'extension de la base géologique 3D, illustre cette évolution technologique et devrait permettre une application progressive de ces outils aux systèmes de complexité modérée. L'évolution des technologies de télédétection (résolutions spatiales et temporelles accrues des capteurs satellitaires) et l'utilisation des données LIDAR automatisent progressivement la cartographie des objets karstiques de surface.

L'intégration croissante des enjeux d'adaptation climatique dans les stratégies de protection s'impose méthodologiquement. Les modifications attendues des régimes de précipitation et l'intensification des extrêmes hydrologiques imposent l'adaptation des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité et des stratégies de protection. Cette adaptation requiert le développement d'approches prospectives intégrant les scénarios climatiques régionaux et une gestion adaptative ajustant les stratégies selon l'évolution des conditions.

Le développement de méthodes d'évaluation économique standardisées constitue une priorité pour faciliter les arbitrages politiques et l'optimisation de l'allocation des moyens. L'amélioration des méthodes d'évaluation des pressions anthropiques, particulièrement pour les nouvelles sources de contamination, nécessite des développements méthodologiques spécifiques adaptés aux spécificités de transfert des milieux karstiques.

Recommandations pour la généralisation

La généralisation des bonnes pratiques à l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée nécessite une structuration renforcée de l'écosystème d'acteurs spécialisés et une harmonisation des approches respectueuse des spécificités territoriales. Cette généralisation passe par le renforcement des compétences techniques des services instructeurs, le développement de l'offre d'expertise privée spécialisée, et la création d'outils de capitalisation et de diffusion des innovations méthodologiques.

Le renforcement des compétences techniques des services instructeurs constitue une priorité pour améliorer la qualité des cahiers des charges et le suivi des études. Cette montée en compétences peut s'appuyer sur des programmes de formation spécialisés et des échanges d'expérience entre territoires. Le développement de l'offre d'expertise privée spécialisée constitue un axe de structuration important, cette offre étant actuellement concentrée sur quelques acteurs spécialisés.

L'harmonisation des pratiques à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée assure la cohérence des approches et facilite la comparabilité des résultats. L'élaboration de guides techniques spécialisés par contexte adapte les recommandations générales aux spécificités territoriales tout en maintenant une cohérence méthodologique. Le développement d'outils de contrôle qualité

standardisés facilite l'évaluation des études et la détection des défauts méthodologiques récurrents

L'organisation de rencontres techniques régulières entre territoires engagés facilite les échanges d'expérience et la diffusion des innovations méthodologiques. Une plateforme collaborative de partage des données et méthodes mutualise les investissements méthodologiques et accélère la diffusion des innovations. En ce sens le travail de l'ASCOMADE est précieux.

Contribution à la résilience territoriale

Au-delà de la protection des ressources en eau et de l'AEP, la délimitation et la protection des zones de sauvegarde construisent la résilience territoriale face aux défis climatiques et environnementaux. Ces démarches illustrent l'évolution des approches de gestion environnementale vers une complexité accrue, une adaptation aux spécificités locales et une nuance méthodologique affirmée.

L'intégration des zones de sauvegarde dans les stratégies territoriales de développement durable dépasse les enjeux sectoriels de l'eau. Leur articulation avec les politiques de préservation de la biodiversité et de lutte contre l'artificialisation des sols contribue à construire la durabilité territoriale à long terme.

Cette note d'accompagnement fournit un référentiel technique et opérationnel aux acteurs engagés dans la protection des ressources stratégiques karstiques. Son appropriation et sa mise en œuvre renforceront la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable sur le bassin Rhône-Méditerranée tout en préservant la qualité des aquifères karstiques et des milieux superficiels qui en dépendent. La formation et la sensibilisation des acteurs territoriaux aux spécificités de ces milieux déterminent la réussite de cette généralisation méthodologique.

Bibliographie

AERMC (2013). Identification des ressources karstiques majeures pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur une partie du massif du Jura. Volume n°1 : rapport, 186 p.

AERMC (2014). Identification et préservation des ressources majeures en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable. Étude de l'aquifère des calcaires jurassiques du seuil et des côtes et arrières-côtes de Bourgogne - Phase 1, 163 p.

AERMC (2021). Guide technique du SDAGE : Identifier et préserver les ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 122 p.

ANTEA GROUP (2014). Identification et préservation des zones de sauvegarde pour l'alimentation en eau potable. Etude de l'aquifère des calcaires jurassico-crétacés des Corbières Orientales. Rapport de phase 2. Agence de l'Eau RMC, 38 p.

Caille et Idées Eaux (2014). Identification des ressources majeures de l'aquifère des calcaires jurassiques du Seuil et des Côtes et Arrières-Côtes de Bourgogne – Phase 2. 175 p.

CENOTE (2020). Notice de la carte des modalités d'infiltration des zones de sauvegarde des masses d'eaux souterraines du Parc naturel régional de la sainte-Baume. 15 p.

Chalikakis, K., Plagnes, V., Guérin, R., Valois, R., Bosch, F.P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. Hydrogeol J, 19, 1169-1180.

Conseil départemental de l'Hérault (2020). Etude hydrogéologique de ressources stratégiques en eaux souterraines et définition des zones de sauvegarde exploitées et non exploitées actuellement -- Phase 2, 22 p.

Doerfliger, N., Jeannin, P.Y., Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology, 39(2), 165-176.

Dörfliger, N., Crochet, P., Guérin, R., Blanchin, R., Marsaud, B. (1999). Guide méthodologique - Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. BRGM/RP-50609-FR, 46 p.

Fénart, P. (2021). Caractérisation hydrogéologique des aquifères karstiques par approche géomorphologique. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 285 p.

Ford, D., Williams, P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, 562 p.

Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., Hötzl, H. (2000). The PI method--a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. Zeitschrift für angewandte Geologie, 46(3), 157-166.

Husson, E., Riotte, J., Sekhar, M., Ruiz, L., Braun, J.J. (2018). Characterizing the spatial and temporal variability of dissolved organic carbon in a tropical watershed. Hydrological Processes, 32(13), 2031-2043.

HYDROFIS (2019). Etude des zones de sauvegarde des masses d'eau souterraines du Parc Naturel Régional de la Sainte-Baume. Rapport de phase 1.

HYDROFIS (2021). Etude des zones de sauvegarde des masses d'eau souterraines du Parc Naturel Régional de la Sainte-Baume. Rapport de phase 2.

IDÉES EAUX, ACTEON (2018). Identification des ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable en vue de leur protection sur le massif du Vercors - Phases 3 et 4 : Réflexions sur les stratégies d'intervention pour la préservation des ressources. Syndicat Mixte du Parc Naturel Régional du Vercors, 79 p.

ISSKA (2021a). Visual KARSYS. A web service for modelling karst aquifers in 3D. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie.

ISSKA (2021b). Carte du Karst | France. Méthodologie d'établissement. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 20 p.

ISSKA (2022). Carte du karst | France. Méthodologie d'établissement. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 20 p.

ISSKA (2024a). KARSYS Doubs CH/FR. Documentation hydrogéologique. Bassin du Doubs transfrontalier CH/FR. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds.

ISSKA (2024b). KARSYS Doubs. Ressources karstiques majeures. Délimitation des zones de sauvegarde. Rapport méthodologique. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, La Chaux-de-Fonds.

ISSKA (2024c). Ressource karstique majeure / Zone(s) de sauvegarde. RKM20 -- Sources du Dessoubre et Bief Ayroux. Note technique. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 10 p.

Iván, V., Mádl-Szőnyi, J. (2017). State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. Environmental Earth Sciences, 76, 112.

Jeannin, P.Y., Eichenberger, U., Sinreich, M., Vouillamoz, J., Malard, A., Weber, E. (2013). KARSYS: a pragmatic approach to karst hydrogeological system conceptualisation. Environmental Earth Sciences, 69(3), 999-1013.

Käss, W. (1998). Tracing technique in geohydrology. A.A. Balkema, Rotterdam, 581 p.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A. (2000). Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. Journal of Hydrology, 238(3-4), 123-138.

Malard, A. (2021). Carte du Karst France - Méthodologie d'établissement. Institut Suisse de Spéléologie et de Karstologie, 20 p.

Mangin, A. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse de Doctorat, Université de Dijon, 124 p.

Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology, 67(1-4), 25-43.

Mardhel, V., Gravier, A., Vittecoq, B., Pinson, S., Garcia, C. (2005). Cartographie de la vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines - Synthèse méthodologique. BRGM/RP-54427-FR, 52 p.

Parise, M., Closson, D., Gutierrez, F., Stevanovic, Z. (2015). Mining geohazards–land subsidence, sinkholes, structural instability: an introduction. Environmental Earth Sciences, 74(12), 5983-5984.

Petelet-Giraud, E., Doerfliger, N., Crochet, P. (2000). RISKE: méthode d'évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Hydrogéologie, 4, 71-88.

Plagnes, V., Kavouri, K., Huneau, F., Garel, E., Jaunat, J., Dörfliger, N. (2010). PaPRIKa: a method for estimating karst resource and source vulnerability-application to nine sites in France. Hydrogeology Journal, 18(2), 339-353.

SEPIA/ANTEA GROUP (2014). Identification et préservation des ressources majeures pour l'alimentation en eau potable. Etude de l'aquifère des calcaires éocènes du Minervois (Pouzols). Rapport de phase 3. Agence de l'Eau RMC, 58 p.

SMAC (2016). Etude d'identification et préservation des ressources souterraines stratégiques pour l'alimentation en eau potable du bassin versant de l'Ardèche. Phase 3, 108 p.

White, W.B. (2002). Karst hydrology: recent developments and open questions. Engineering Geology, 65(2-3), 85-95.

Witting, K.S., Aigner, T., Barth, G., Häring, M.O. (2004). Quantitative karst groundwater vulnerability assessment based on groundwater residence time. Environmental Geology, 46(8), 1143-1156.

Wu, Q., Deng, C., Chen, Z. (2016). Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. Geomorphology, 266, 1-10.

ANNEXES

Annexe 1. Questions d'auto-évaluation de la complexité

Mon système est SIMPLE si :

- Structure géologique monoclinale ou faiblement plissée
- Un exutoire principal clairement identifié
- Limites bassin ≈ limites topographiques
- Régime hydrologique relativement régulier
- Pas de pertes significatives de cours d'eau

Mon système est MODÉRÉ si :

- Structure géologique plissée modérément complexe
- Plusieurs exutoires avec hiérarchisation variables
- Intercalations marneuses dans formations carbonatées
- Quelques connexions intersystémes

Mon système est COMPLEXE si :

- Tectonique complexe (chevauchements, failles majeures)
- Système binaire (pertes + infiltration)
- Forte variabilité fonctionnelle saisonnière
- Connexions hydrauliques multiples non élucidées

SI...	MÉTHODES ZONE 1 (Production)	MÉTHODES ZONE 2 (Alimentation)	COÛT	DÉLAI
Système SIMPLE budget < 50k€ données OK	• Chroniques sources • Modélisation 2D	• IDPR • Analyses physiographie	30-80k€	4-6 mois
Système SIMPLE budget confortable	+ Traçages validation + Géophysique ciblée	+ Validation terrain + Objets karstiques	50-100k€	6-9 mois
Système MODÉRÉ données complètes	• Traçages • Méthodes multicritères (EPIK/PaPRIKa)	• Carte du Karst • Multicritères • Télédétection	80-150k€	8-12 mois
Système MODÉRÉ données lacunaires	+ Investigations + Géophysique + Campagne traçages	+ Cartographie détaillée + Diagnostic terrain	120-200k€	12-18 mois
Système COMPLEXE enjeu > 50 000 hab	• Géophysique • KARSYS 3D • Forages reconnaissance	• Diagnostic karstologique expert • Validation approfondie	200-500k€	18-24 mois
Système COMPLEXE enjeu < 50 000 hab	• KARSYS 3D allégé • Géophysique ciblée • Traçages stratégiques	• Diagnostic simplifié • LIDAR haute résolution	150-250k€	12-18 mois

Les points (•) indiquent les méthodes de base recommandées pour chaque contexte, tandis que les plus (+) désignent les compléments optionnels selon les moyens disponibles. Ces combinaisons sont données à titre d'exemple et doivent être adaptées aux spécificités de chaque territoire.

Annexe 2 : Check-list finale avant démarrage

- Évaluer correctement la complexité (auto-évaluation + avis expert si doute)
- Compiler exhaustivement les données existantes
- Dimensionner budget ET délais de façon réaliste
- Identifier les personnes «
- Valider croisée dans cahier des charges
- Anticiper gouvernance si bassin multi-collectivités
- Budgéter phase concertation territoriale
- Identifier sources financement (Agence Eau RMC, autres)