



Etablissement Public Territorial de Bassin Charente (EPTB Charente)

Étude des différentes solutions techniques
permettant d'optimiser la capacité du Karst de La
Rochefoucauld à soutenir le fleuve Charente en
étiage



Rapport n°A132549/version B– Octobre 2024

Projet suivi par

Christophe SUBIAS – 06.18.29.66.28 – christophe.subias@anteagroup.fr

Bruno COUPRY – 05.61.62.50.68 – bruno.coupry@eaucea.fr

Josselin BERTHELON – 05.61.62.50.68 – josselin.berthelon@eaucea.fr



72 rue Riquet
31000 Toulouse
Email : eaucea@eaucea.fr



Diapason Bât. B - Rue Jean Bart
31670 LABEGE CEDEX

Fiche signalétique

EPTB Charente

Étude des différentes solutions techniques permettant d'optimiser la capacité du Karst de La Rochefoucauld à soutenir le fleuve Charente en étiage

CLIENT

EPTB Charente

5 rue Chante-Caille
ZI des Charriers
17100 SAINTES

Amélie JUGNIOT

Chargée de projet – Hydrogéologie
Animatrice du programme LIFE Eau & Climat
Standard : 05 46 74 00 02
Ligne directe : 05 46 83 87 76

SITE

Sources de la Touvre

RAPPORT

Responsable du projet

Christophe SUBIAS
Bruno COUPRY

Interlocuteur commercial

Christophe SUBIAS

Implantation chargée du suivi du projet

ANTEA Implantation de Toulouse
05.61.00.70.40
secretariat.toulouse-fr@anteagroup.fr

Rapport n°

A132549

Version n°




Version B d'octobre 2024

Votre commande et date

Commande du 9 oct. 2023

Projet n°

MPYP23-0122

	Nom	Fonction	Date	Signature
Rédaction	Christophe SUBIAS Bruno COUPRY Josselin BERTHELON	Hydrogéologue Hydrologue Hydrogéologue	Septembre 2024	
Approbation	Christophe SUBIAS	Hydrogéologue	Septembre 2024	
Vérification	Christophe SUBIAS	Hydrogéologue	Septembre 2024	
Relecture qualité	Odile MONCOURTOIS	Secrétariat	Septembre 2024	

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A		115	5	Rapport initial
B	17/12/2024	154	7	Modifications apportées par l'EPTB

Sommaire

1. Contexte, objectifs de l'étude et méthode de travail	7
1.1. Contexte général de l'étude.....	7
1.2. Objectifs de l'étude	9
1.3. Phasage de l'étude	13
1.4. Contexte hydrologique : les objectifs hydrologiques théoriquement envisageables du soutien d'étiage de la Charente par la Touvre	15
1.5. Solutions existantes dans la littérature.....	19
1.6. Approche bibliographique et retours d'expérience (voir Annexes I et II).....	23
1.7. Synthèse des entretiens effectués avec les experts	23
1.8. Synthèse des entretiens effectués avec les acteurs du territoire	29
1.9. Conclusion et principes retenus des entretiens et de l'analyse bibliographique	31
1.10. Synthèse des solutions techniques retenues	32
2. Etape 2 : Analyse des solutions techniques identifiées.....	35
2.1. Principes d'analyse des solutions.....	35
2.2. Solutions fondées sur la nature à l'aval immédiat des résurgences : restauration des herbiers et restauration hydromorphologique de la Touvre	36
2.3. Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences.....	41
2.4. Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant.....	47
2.5. Solution fondée sur l'obstruction des conduits karstiques par la mise en place d'un dispositif permettant de réduire la section d'écoulement à l'amont immédiat des résurgences	50
2.6. Solution fondée sur la nature sur le bassin d'alimentation du karst par aménagement des pertes.....	56
2.7. Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par une réflexion sur les étangs et leurs débits réservés	61
2.8. Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par la création de retenue(s).....	69
2.9. Solution fondée sur la surexploitation du système karstique.....	72
3. Etape 3 : Comparaison des solutions.....	78
3.1. Principes	78
3.2. Analyse comparative	78

Tables des illustrations

Table des figures

Figure 1. Position des bassins versants des points nodaux du bassin de la Charente (concernant la Touvre, seul le BV hydrologique est représenté, son BV hydrogéologique est nettement plus étendu)	10
Figure 2. Bassin versant hydrogéologique des sources de la Touvre.....	11
Figure 3. Localisation des sources (Source : Géoportail)	12
Figure 4. Bilan hydrologique des apports à la Charente à Beillant	16
Figure 5. Illustration du transfert dans le temps de la vidange des stocks du karst (valeurs de transfert théorique).....	16
Figure 6. Régime de la Touvre et de la Tardoire à Coulgens.....	17
Figure 7. Prélèvement des apports excédentaires de la Tardoire en hiver en étiage pour recharge artificielle du karst.....	18
Figure 8 Soutien des débits en étiage de la Tardoire et donc de la Touvre	18
Figure 9 : Typologie de gestion karstique du karst	21
Figure 10 : Spatialisation amont vs karst vs aval des solutions.....	34
Figure 11 : Photographie illustrant l'impact des herbiers aquatiques de la Maillerie sur les écoulements. Toute la section est encombrée (source Eaucea).	37
Figure 12 : Implantation des diguettes (Hydro Invest 2009).....	42
Figure 13 : Implantation des diguettes (Hydro Invest 2009).....	43
Figure 14 : Photographie aérienne du seuil de la Tracherie (photographie Eaucea).....	47
Figure 15 : Photographie du siphon du Bouillant. Au premier plan, bloc effondré (source AQUATEK) 50	
Figure 16 : Incidence théorique des travaux mentionnés par M. SEGUIN sur le débit moyen mensuel de la Touvre	51
Figure 17 : Schéma de visualisation des effondrements depuis 1975 (source M. SEGUIN)	52
Figure 18 : Carte des zones d'infiltration préférentielle sur le système de la Touvre	59
Figure 19 : Schéma d'installation de l'usine de pompage du Lez	73
Figure 20 : Schéma de fonctionnement du système du LEZ	74
Figure 21 : Classification des systèmes karstiques à partir des analyses corrélatoires	75
Figure 22 : Structure géologique du karst de La Rochefoucauld (d'après Vouvé 1970 repris par SEGUIN)	75

Table des tableaux

Tableau 1 : Liste des hydrogéologues sollicités pour les entretiens	13
Tableau 2 : Liste des acteurs du territoires rencontrés.....	14
Tableau 3 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur le retard et/ou ralentissement de la vidange naturelle du karst	26
Tableau 4 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst.....	27
Tableau 5 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur la surexploitation des aquifères karstiques	28
Tableau 6 : Synthèse des solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de la vidange du karst	32
Tableau 7 : Synthèse des solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst.....	33

Tableau 8 : Synthèse des solutions basées sur la surexploitation de l'aquifère karstique	33
Tableau 9 : Principes retenus à partir des retours d'expériences et de l'analyse bibliographique	36
Tableau 10 : Avantages et inconvénients de la solution de gestion des herbiers et des solutions type hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature	40
Tableau 11 : Avantages et inconvénients du projet de diguette	46
Tableau 12 : Avantages et inconvénients sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant.....	49
Tableau 13 : Avantages et inconvénients du projet d'obstruction des conduits.....	55
Tableau 14 : Synthèse des principales pertes	56
Tableau 15 : Synthèse des principaux tracés sur le système de la Touvre.....	57
Tableau 16 : Avantages et inconvénients du projet d'obstruction des conduits.....	60
Tableau 17 : Avantages et inconvénients des solutions fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par une réflexion sur les étangs et leurs débits réservés	68
Tableau 18 : Avantages et inconvénients sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par la création de retenue(s)	71
Tableau 19 : Principes retenus à partir des retours d'expériences et de l'analyse bibliographique	78
Tableau 20 : Analyse comparative des solutions	79

Table des annexes

Annexe I :	Bibliographie
Annexe II :	Compte-rendu des entretiens avec les experts
Annexe III :	Compte-rendu des entretiens avec les acteurs du territoire
Annexe IV :	Etude de la solution visant à piloter la vidange par l'aval
Annexe V :	Etude technique de la solution de surélévation du fil d'eau à l'aval des sources de la Touvre
Annexe VI :	Etude technique de la solution d'obturation des conduits karstiques
Annexe VII :	Etude de la gestion des apports depuis le domaine granitique

1. Contexte, objectifs de l'étude et méthode de travail

1.1. Contexte général de l'étude

Les sources de la Touvre constituent en termes de débits annuels la seconde résurgence karstique de France après la Fontaine du Vaucluse. Son débit oscille entre 5 m³/s en étiage et plus de 40 m³/s en crue, pour un débit moyen annuel de l'ordre de 13 m³/s. Ces sources drainent un important système karstique dit binaire, c'est-à-dire alimenté par les infiltrations diffuses sur le plateau calcaire (appelé « grand karst » ou karst de La Rochefoucauld) et par des infiltrations directes (pertes) provenant d'un impluvium non calcaire. Le volume annuel drainé par les sources est évalué, en fonction des années, entre 300 et 350 Mm³, avec une contribution des pertes des rivières (Bandiat, Tardoire) à hauteur de 50 à 70%.

Le système karstique de la Touvre constitue une ressource stratégique pour différents usages en eau. En effet, 90% de la production d'eau potable pour l'agglomération du Grand Angoulême (entre 7 et 8 Mm³ prélevés) est réalisée à partir de la source du Bouillant qui constitue l'une des trois sources principales du système de la Touvre. De nombreuses études et travaux ont été menés par Grand Angoulême pour comprendre le fonctionnement du karst, protéger cette ressource fragile et sécuriser l'alimentation en eau des abonnés.

Par ailleurs, les sources contribuent au maintien du débit de la Charente dont dépendent au titre de l'eau potable les villes traversées par le fleuve en aval d'Angoulême ainsi que 30 à 40% de la Charente-Maritime (environ 18 Mm³ d'eau prélevés, le fleuve Charente alimentant le réseau littoral d'Eau17 et la CDA de la Rochelle). Le débit de la Touvre peut être supérieur au débit de la Charente au niveau de la confluence et représente près de 50% du débit transitant à Beillant lors des étiages sévères, malgré le soutien du débit par les barrages de Lavaud et Mas Chaban. Les apports de la Touvre, et donc du karst de la Rochefoucauld, jouent donc un rôle majeur pour la situation hydrologique du fleuve Charente entre Angoulême et l'estuaire.

Cette ressource est également utilisée aujourd'hui par différents acteurs (agricoles 6 Mm³, industriels 1 Mm³) et l'impact des prélèvements dans le karst sur les débits de la Touvre, en particulier en période d'étiage a fait l'objet d'un débat à travers plusieurs approches scientifiques et réglementaires, menées notamment dans le cadre des études pour la révision des valeurs de DOE (Débit d'Objectif d'Etiage) et de DCR (Débit de Crise) de la Touvre à Foulpouge (étude menée en 2020).

En cas de niveau bas dans le karst ou de débit faible dans la Touvre, les services de l'Etat imposent la mise en place de restrictions graduées des prélèvements autres que prioritaires (agricoles et industriels). Par le passé, cette situation a pu aboutir à des conflits d'usage, notamment des années 1989 à 1992, où la succession de plusieurs étiages particulièrement sévères a amené à des fortes restrictions ou interdictions de certains usages sur le bassin.

Dans les années 1990, l'analyse de la piézométrie par le Conseil Départemental 16 a montré que le faucardage de la végétation aquatique en aval des sources avait une influence quasi-immédiate sur le niveau du karst mesuré à quelques kilomètres de là, à Mornac. L'enlèvement de la végétation aquatique avait pour but d'accélérer les vitesses en aval des émergences karstiques et donc de faciliter la vidange du karst (et donc la baisse du niveau de la zone noyée).

Sur la base de ces observations, l'idée de mettre en place un système de rétention de l'eau du karst, en « bridant » les résurgences, a émergé sur le territoire. L'objectif d'un tel dispositif serait ainsi de stocker temporairement de l'eau dans le milieu souterrain, en période de hautes eaux, pour la restituer en période déficitaire. Il a initialement été proposé d'installer des diguettes amovibles, remontant temporairement le fil d'eau des émergences afin de retarder la vidange du karst. Ce projet expérimental a historiquement été appelé « Projet Diguette ». L'idée de la nécessité d'une réflexion a été reprise en 2004 par les acteurs du PGE

En 2008-2009, à la demande du Conseil Général de la Charente, une étude technique de faisabilité a été réalisée par la société HydroInvest. Cette étude conclue sur la faisabilité de mettre en place deux digues de 90 m de long au Bouillant et de 28 m de long à Font de Lussac, pour des hauteurs respectives de 1,1 et 1,8 m. Ces seuils permettraient une rehausse du niveau de +0,5 m par rapport au niveau moyen des résurgences. Le bureau d'études estime le volume théorique potentiellement stockable entre 4,7 et 7 Mm³. Plusieurs réunions de concertation ont ensuite eu lieu et ont permis de recenser l'ensemble des inquiétudes et questions relatives au projet. L'une des inquiétudes réside dans l'impact potentiel du projet sur le captage d'eau potable du Bouillant. L'inquiétude porte également sur des possibles effets géotechniques (effondrements, affaissements) sur le patrimoine entourant les émergences (église...) et sur l'irréversibilité des impacts d'un tel projet, y compris dans sa version expérimentale et temporaire.

En 2014, l'EPTB Charente sollicite l'Agence Régionale de Santé (ARS) afin que celle-ci se prononce sur la compatibilité du projet avec la protection du captage destiné à l'alimentation en eau potable des sources de la Touvre. Les conclusions de l'hydrogéologue agréé, M. Bruno DE GRISSAC, indique que « *le projet expérimental "diguette", tel qu'il est décrit dans le rapport HYDRO-INVEST, HI 2009030045 – M6303 de septembre 2009, peut être considéré comme compatible avec la protection des sources de la Touvre* ». Il considère que l'expérimentation, dont les incidences seront réversibles :

- *se traduira par des variations de niveau et de débit, le cas échéant de turbidité, dans des plages de valeurs connues naturellement et déjà observées ;*
- *n'augmentera que très marginalement la vulnérabilité, naturellement faible, des sources proprement dites, et ce du fait de la contre-pression générée par la rehausse du fil de l'eau ;*
- *ne modifiera pas la vulnérabilité ou les risques sur le bassin d'alimentation des sources ;*
- *n'aura pas d'influence notable sur les prélèvements réalisés pour la production d'eau potable et a priori pas d'incidence sur la qualité, ou tout au moins d'incidence susceptible de remettre en cause la production d'eau potable*

Malgré cet avis de l'hydrogéologue agréé, face aux inquiétudes des acteurs du territoire mais également aux nombreuses inconnues sur les impacts induits par ce dispositif sur le milieu (réactivation de trop-pleins, impact sur l'écologie, risques d'effondrement...) et sur la réversibilité du système, ce projet ne s'est jamais concrétisé.

En janvier 2019, l'EPTB Charente s'est engagée dans une démarche prospective visant à comprendre et anticiper le changement climatique et ses impacts sur la ressource en eau à l'horizon 2050. Dans le cadre de cette démarche, pour faire face aux impacts du changement climatique sur le bassin de la Charente, le projet de gestion de la vidange du karst a de nouveau été abordé par les acteurs du territoire.

À pluviométrie équivalente, l'augmentation des températures accentuera l'évaporation et la sécheresse des sols ce qui entrainera une baisse de la recharge des nappes et une baisse des débits des rivières. Les résultats de l'étude Explore 70 montrent une baisse importante des débits des cours d'eau de l'ordre de -30 à -40% en période d'étiage ainsi qu'un allongement de la durée des étiages.

Par conséquent, le déficit que connaît actuellement le bassin de la Charente pourrait être multiplié par 2 à l'horizon 2050, d'après les prévisions de baisse des débits modélisés par Explore 2070.

Face à ce constat, la démarche « Charente 2050 » a abouti à la présentation en janvier 2023 d'un plan d'adaptation et d'atténuation aux changements climatiques co-construit et partagé par tous les acteurs du bassin versant de la Charente. Parmi un mix de solutions (gouvernance, sobriété, restauration des milieux...), des actions dites de « rupture » ont également été identifiées. Parmi ces solutions, on trouve le dessalement d'eau de mer, l'augmentation des capacités des barrages, la réalimentation de la Charente par les bassins voisins de la Dordogne et de la Vienne mais également la gestion de la vidange du karst de la Rochefoucauld. La faisabilité technique et financière, l'évaluation des impacts et des bénéfices (en termes de quantitatifs) sont proposées pour permettre aux acteurs du bassin de se positionner sur la pertinence de ces solutions à l'échelle du bassin versant.

Sur la base de la concertation engagée depuis 2019 dans le cadre de Charente 2050, la mise en œuvre d'une expérimentation de gestion de la vidange du karst a également été inscrite dans la feuille de route pour la stratégie 2022-2027 de gestion quantitative du bassin de la Charente, comme une action à étudier afin de sécuriser le soutien d'étiage, les besoins des milieux et les usages sur le long terme. Ce type d'expérimentation s'inscrit aussi dans le cadre la disposition C24 du nouveau SDAGE Adour-Garonne « Expérimenter des dispositifs utilisant la capacité régulatrice des nappes » et dans la charte de l'Entente pour l'eau du bassin Adour-Garonne « De l'eau pour les territoires du Grand Sud-Ouest » cosignée en 2018 par le préfet coordinateur de bassin, les régions Occitanie et Nouvelle Aquitaine et le Comité de Bassin Adour-Garonne.

1.2. Objectifs de l'étude

C'est dans ce contexte historique et réglementaire que l'EPTB Charente a engagé, à partir de 2022, des réflexions concernant la gestion quantitative de la ressource en eau stratégique du Karst de La Rochefoucauld. Ces réflexions se basent sur deux axes :

1. Axe 1 : Optimisation de la gestion des prélèvements dans le karst

- Etape 1 : Actualisation du mode de gestion actuel : recherche d'un piézomètre de référence plus pertinent, actualisation des valeurs seuils
- Etape 2 : Analyse de l'impact (quantitatif et inertiel) des prélèvements sur les débits de la Touvre et de la Charente
- Etape 3 : Transformation du modèle en outil de gestion conjoncturelle
- Etape 4 : Détermination du volume prélevable.

2. Axe 2 : Expérimentation d'un dispositif de gestion de la vidange du karst

La présente étude s'inscrit dans l'Axe 2 de ces réflexions. Grâce à l'avis d'experts ainsi qu'à la bibliographie scientifique et aux retours d'expérience, le but demandé est de proposer et d'étudier des solutions visant à ralentir et/ou retarder la vidange du système de la Touvre, et/ou de favoriser sa recharge. L'objectif final étant de renforcer ou optimiser le soutien d'étiage de la Charente à l'aval d'Angoulême via les apports de la Touvre.

L'étude doit permettre aux acteurs du territoire d'identifier la ou les solutions à privilégier pour la suite des réflexions, et doit servir de base à l'élaboration d'un projet d'expérimentation, dont le but est de tester la solution en grandeur nature et de mieux comprendre la réactivité du système karstique au dispositif et de mesurer et quantifier les impacts sur le milieu naturel.

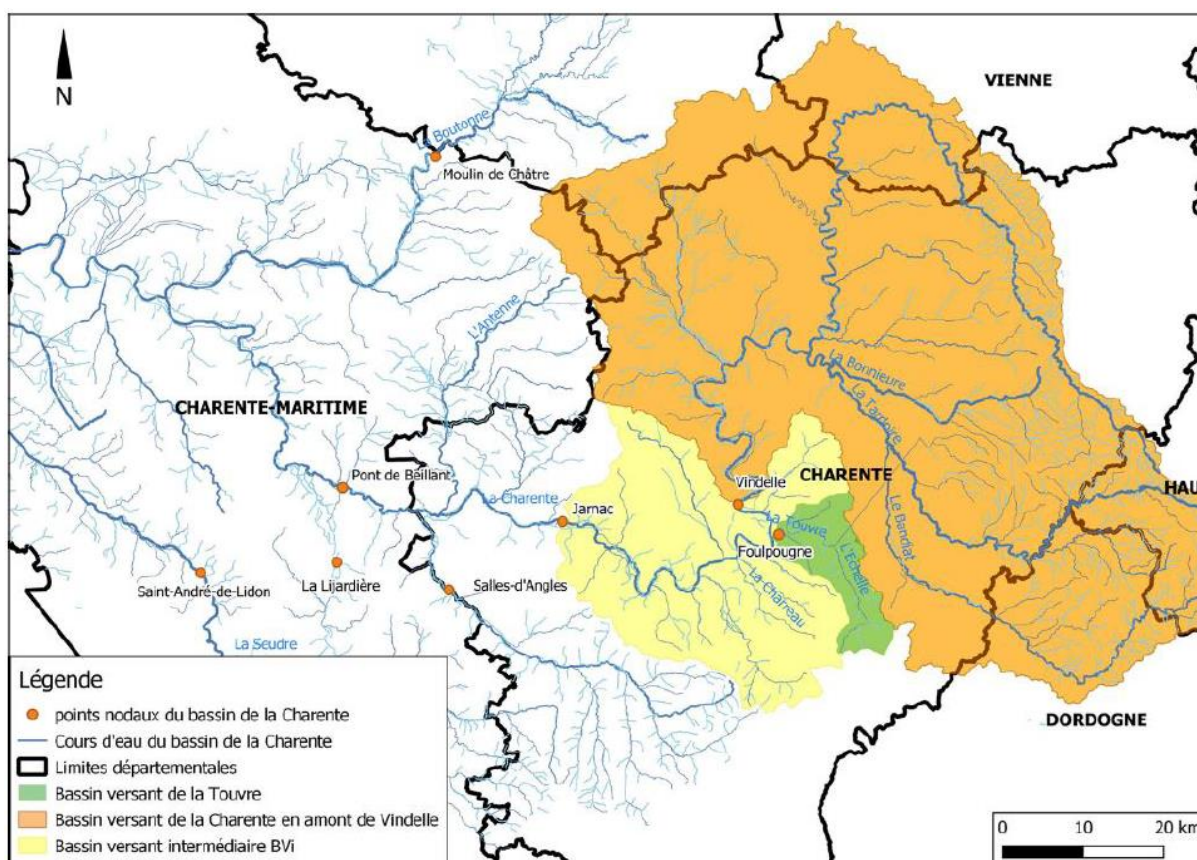


Figure 1. Position des bassins versants des points nodaux du bassin de la Charente (concernant la Touvre, seul le BV hydrologique est représenté, son BV hydrogéologique est nettement plus étendu)

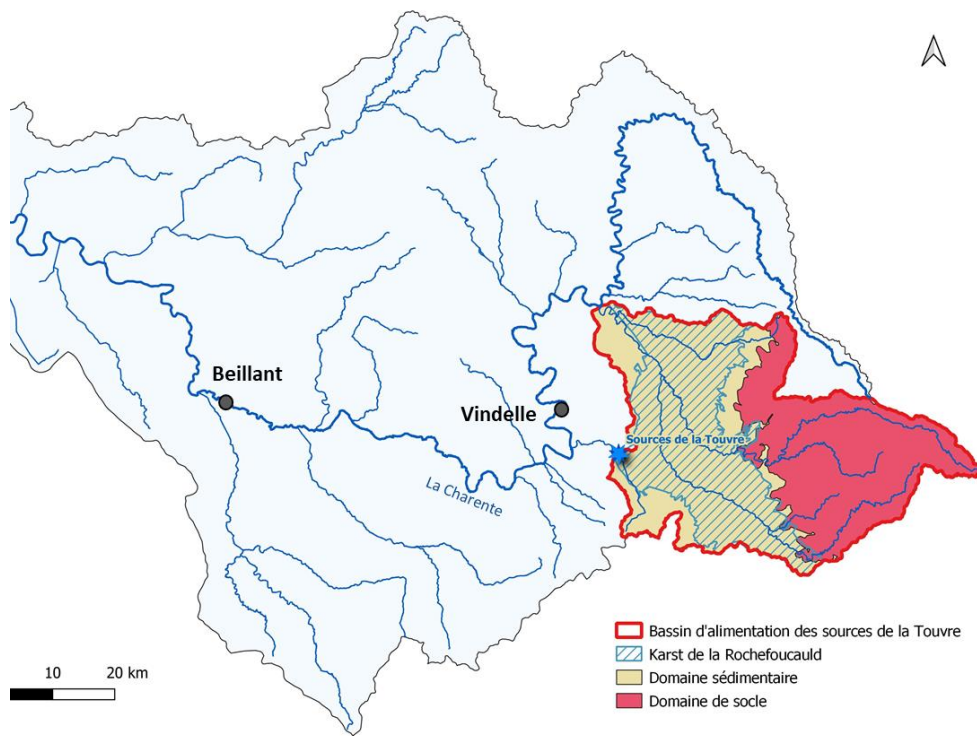


Figure 2. Bassin versant hydrogéologique des sources de la Touvre



Photographie 1. Le Dormant



Photographie 2. Le Bouillant



Photographie 3. Fontaine de Lussac



Photographie 4. Source de la Lèche



Figure 3. Localisation des sources (Source : Géoportail)

1.3. Phasage de l'étude

L'étude se divise en trois phases :

- **Phase 1** : Identification de l'ensemble des solutions techniques envisageables
- **Phase 2** : Documentation et analyse des solutions techniques identifiées
- **Phase 3** : Comparaison des solutions et choix de la solution la plus adaptée

Un **comité d'experts** a été constitué par l'EPTB Charente afin d'apporter une expertise technique et des retours d'expérience sur les solutions étudiées.

La phase 1 prévoyait la réalisation de plusieurs entretiens (en présentiel ou en visioconférence) dont :

- **10 entretiens avec des hydrogéologues**, choisis en concertation avec l'EPTB Charente, de par leurs compétences et expériences en relation avec les systèmes karstiques ;
- **10 entretiens avec des acteurs et usagers du territoire**, afin de bien comprendre quels sont les enjeux identifiés sur le bassin d'alimentation des sources et recueillir la connaissance et les données dont disposent les acteurs de terrain.

N°	NOM - Fonction - Organisme
Exp 1	Bruno ARFIB - Enseignant chercheur Aix Marseille Université (AMU)
Exp 2	Michel BAKALOWICZ – Membre du conseil scientifique du Comité de bassin, professeur émérite, chargé de recherches Université de Montpellier, conseiller scientifique auprès du BRGM
Exp 3	Jean-Christophe MARECHAL , Directeur Direction Eau Environnement Processus et Analyses, BRGM
Exp 4	Laurent CADILHAC – Hydrogéologue, Agence de l'EAU Rhône-Méditerranée-Corse
Exp 5	Nicolas FRISSANT - BRGM Montpellier (R&D sur-stockage dans les aquifères)
Exp 6	Marc LAMBERT – Hydrogéologue, Directeur IIBSN (Institution Interdépartementale du Bassin de la Sèvre Niortaise) – Ex-Directeur de Charente Eaux
Exp 7	Michaël GOUJON , Hydrogéologue, Responsable du service "Ressource en Eau – Hydrogéologie" EAU17
Exp 8	Michel SEGUIN - Hydrospéléologue, Groupe de Recherches Scientifiques Touvre
Exp 9	Laurent DANNEVILLE , Hydrogéologue et directeur adjoint du Parc Naturel Régional des Grands Causses
Exp 10	Philippe CROCHET , Hydrogéologue retraité et expert karst

Tableau 1 : Liste des hydrogéologues sollicités pour les entretiens

Bruno DE GRISSAC, hydrogéologue et directeur du SMEGREG, a également été consulté au titre de coordonnateur des hydrogéologues agréés en matière d'hygiène publique pour le Département de la Charente par l'Agence Régionale de Santé Nouvelle-Aquitaine.

N°	Fonctions	NOM - Fonction - Organisme
Entretien 1	Syndicat de rivière	Mathieu TALLON , SYBRA
Entretien 2	DREAL - ABF	Hélène Bizet , DREAL – Réseau Paysage de Nouvelle Aquitaine Fabien Chazelas , Architecte Bâtiment de France
Entretien 3	Syndicat de rivière	Emmanuel ROJO-DIAZ , SyBTB Quentin VIAL , Robin FRUGIER , SyBTB David MAHREIN , Joseph HYPOLYTE , SYMBA-BT
Entretien 4	Associations environnementales et Fédération de Pêche	Alain BOUSSARIE – Charente Nature Jacques BRIE - UFC Que Choisir Valentin HORTOLAN - FDP Charente Mathieu LABROUSSE - FDP Charente Aude MATHIOT - Grand Cognac, gestionnaire site Natura 2000 des sources
Entretien 5	Grand Angoulême & SEMEA	Julien SARDA - SEMEA Thierry HUREAU - Elu Grand Angoulême Francis LAURENT - Elu Grand Angoulême Frédéric GAUTHIER - Grand Angoulême Delphine MAZEAU - Grand Angoulême
Entretien 6	Profession Agricole	Olivier TRISSE - CA Charente & OUGC Karst Thérèse N'DAH - OUGC Cogest'eau Guillaume CHAMOULEAU - Vice-président CA Charente Christian DANIAU - Président CA Charente Sébastien SCHAEFFER - Président OUGC Cogest'eau Pierre DELAVALADE - ancien Président OUGC Karst Jean-Sébastien POLLMAN - Vice-Président OUGC Karst
Entretien 7	Elus Touvre	Brigitte BAPTISTE Maire de Touvre Éliane REYNAUD Adjointe à la mairie de Touvre
Entretien 8	Pisciculture	Yann BELLET - truite Bellet Laurent CHABANAIS - groupe Aqualande Valentin DEPORTE - groupe Aqualande

Tableau 2 : Liste des acteurs du territoires rencontrés

1.4. Contexte hydrologique : les objectifs hydrologiques théoriquement envisageables du soutien d'étiage de la Charente par la Touvre

Quelles que soient les solutions envisagées, l'objectif de la gestion quantitative du bassin de la Charente est de renforcer les débits d'étiage, c'est-à-dire sur la période estivale, majoritairement entre juillet et octobre compris.

La première cible géographique serait la Touvre, mais l'objectif principal reste l'axe Charente. Il est donc intéressant d'analyser les ordres de grandeur du fonctionnement hydrologique actuel. Le système étudié et sur lequel on souhaite agir se constitue :

- D'un bassin en amont du karst dont le principal indicateur est la station La Tardoire à Coulgens [Pont de Coulgens], indicateur des débits qui « échappent au karst ».
- De la Touvre, exutoire du karst, dont le principal indicateur est la station La Touvre [résurgence] à Gond-Pontouvre [Foulpougne]
- De la Charente en limite d'influence de l'onde de marée, dont l'indicateur est la station La Charente à Chaniers - Beillant RG – aval

Le graphe ci-dessous présente les débits moyens mensuels issus des deux stations Tardoire et Touvre, ainsi qu'une évaluation des apports du bassin versant intermédiaire (BVI) entre ces deux stations et Beillant. Le cumul des trois débits constitue le débit observé à Beillant.

Ce bilan hydrologique est effectué sur la période 2006/2023 où l'on bénéficie d'informations hydrologiques sur les trois stations.

La Figure 4 illustre les quelques mécanismes fondamentaux que l'on doit retenir :

- Les apports directs de la Tardoire à la Charente ne sont significatifs qu'en période hivernale.
- Les apports de la Touvre sont beaucoup plus réguliers dans l'année que ceux du bassin versant intermédiaire. Il y a un facteur 3 entre le mois sec et le mois humide sur la Touvre alors qu'il est d'un facteur 9 sur la Charente à Beillant voire de 13 si l'on exclue la Touvre. Cela s'explique par le caractère capacitif du karst qui amorti très fortement les fluctuations instantanées des pluies et des débits entrants.
- En conséquence le poids relatif de la Touvre est modeste en hiver (12% des apports) mais déterminant en étiage (42% des apports en aout).

En partant de ces constats, le cœur de la stratégie envisageable consiste à renforcer les débits de la Touvre en étiage ce qui suppose de déplacer des volumes et des débits des périodes abondantes vers les périodes d'étiage.

Ce principe de transfert saisonnier est exploité sur la Charente amont avec les barrages de Lavaud et Mas Chaban qui stockent l'eau hivernale et la relâchent en étiage.

La gestion du karst consisterait donc à exploiter cet effet de transfert dans le temps avec deux grandes options qui peuvent d'ailleurs se combiner.

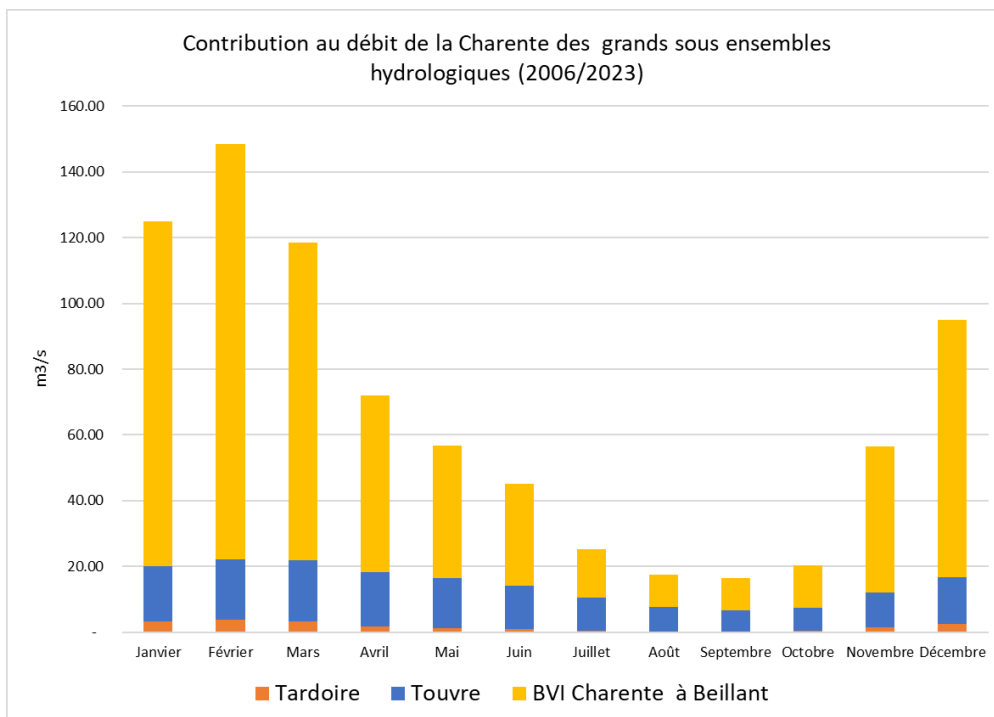


Figure 4. Bilan hydrologique des apports à la Charente à Beillant

1.4.1. En gérant la vidange du karst :

Dans l'illustration 5, on représente un transfert de l'ordre de 14 millions de m³ et l'on augmenterait le débit d'étiage entre +2,2 m³/s et +1,2 m³/s. **Ces valeurs illustrées sont totalement théoriques** mais correspondent à des ordres de grandeurs pertinents pour la Charente.

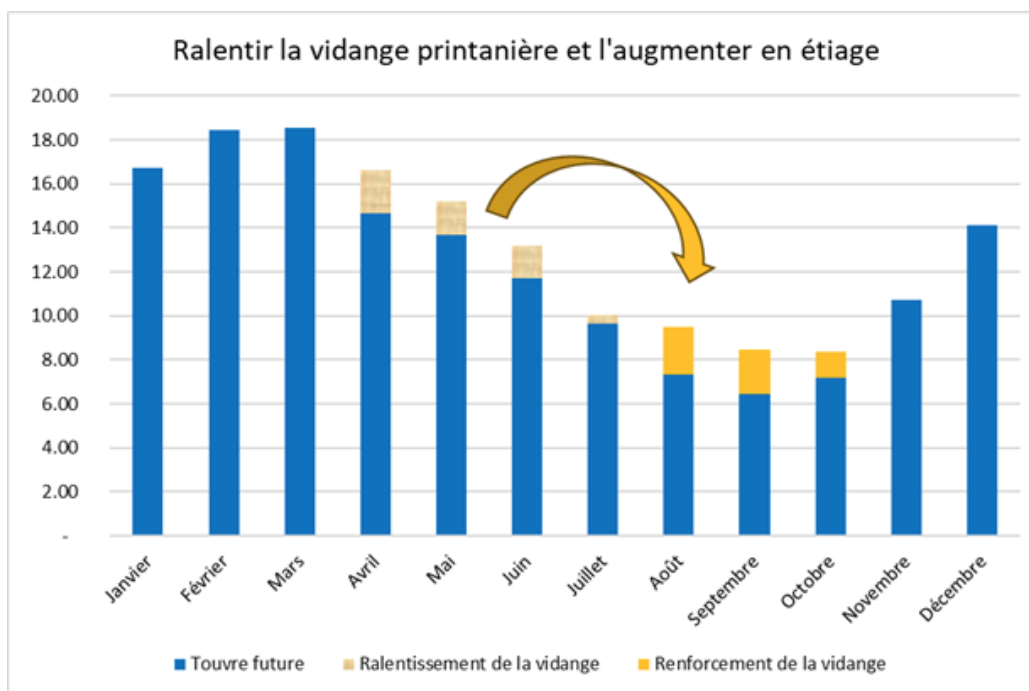


Figure 5. Illustration du transfert dans le temps de la vidange des stocks du karst (valeurs de transfert théorique)

1.4.2. En renforçant les apports au karst depuis le bassin cristallin

Le principe est de considérer que la gestion du bassin cristallin amont (Tardoire et Bandiat) pourrait être réorientée au profit du karst.

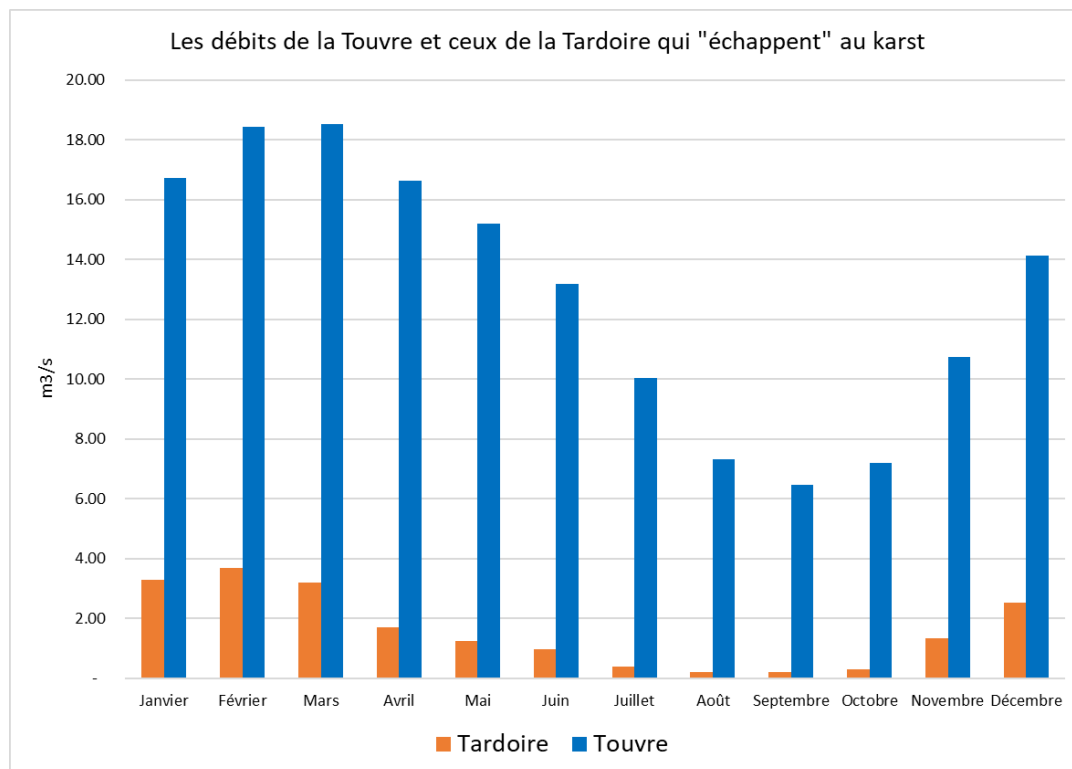


Figure 6. Régime de la Touvre et de la Tardoire à Coulgens

Dans cette hypothèse, il s'agirait de transférer les volumes hivernaux qui arrivent directement à la Charente vers le karst (en effet, les débits souvent nuls de la Tardoire à Coulgens indiquent qu'il y a très peu d'eau qui « échappe au karst » en été). D'autre part, il faut aussi maintenir une continuité hydraulique en réservant une part de débit minimum à la Tardoire (par exemple 10% du module soit environ 1,6 m³/s). C'est donc un partage des eaux issues du massif cristallin qui accentue le « court-circuit » de la Charente amont au profit du karst.

Les deux méthodes possibles seraient alors :

- Soit de détourner une part de ces eaux excédentaires pour renforcer le remplissage du karst (épandage, augmentation des pertes). Dans ce cas, il n'y pas de pilotage facile de ces débits mais il est attendu que le système « amortisseur du karst » joue pleinement sa fonction de retardement et d'étalement dans le temps des débits injectés.
- Soit de les stocker dans une ou des retenues situées dans le massif cristallin puis de les relarguer en étiage. Dans ce cas, il est possible d'envisager des lâchers ciblés en étiage en espérant qu'ils se perdent dans les gouffres et transitent rapidement et quasi intégralement vers la Touvre.

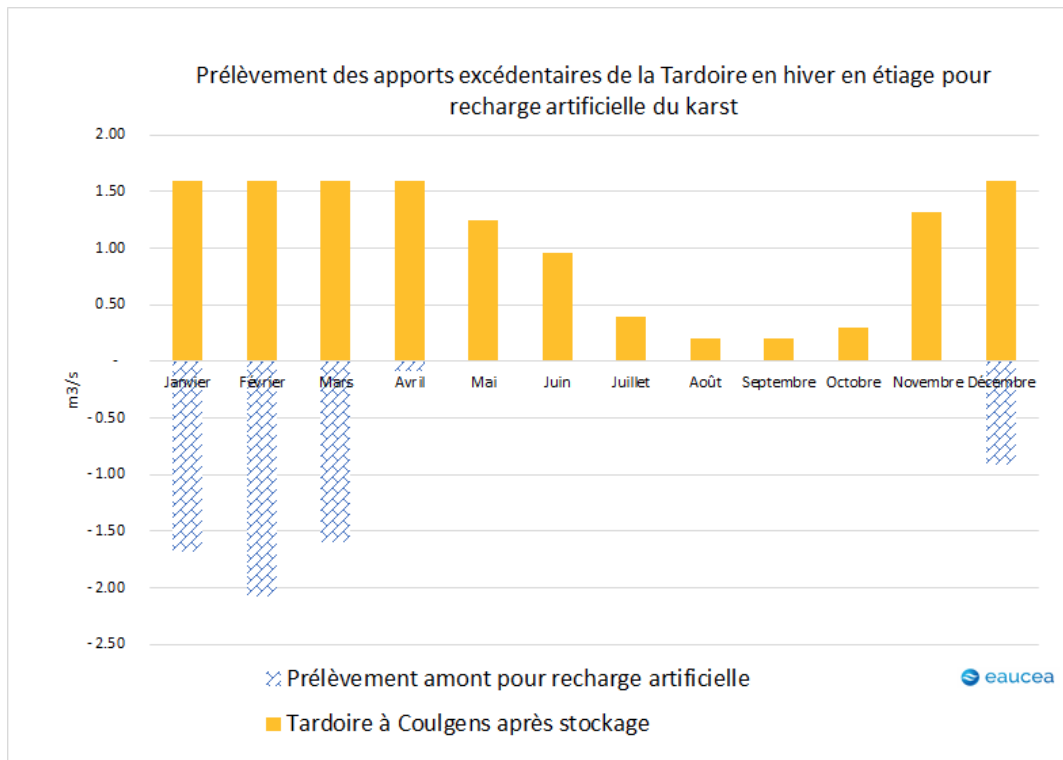


Figure 7. Prélèvement des apports excédentaires de la Tardoire en hiver en étiage pour recharge artificielle du karst

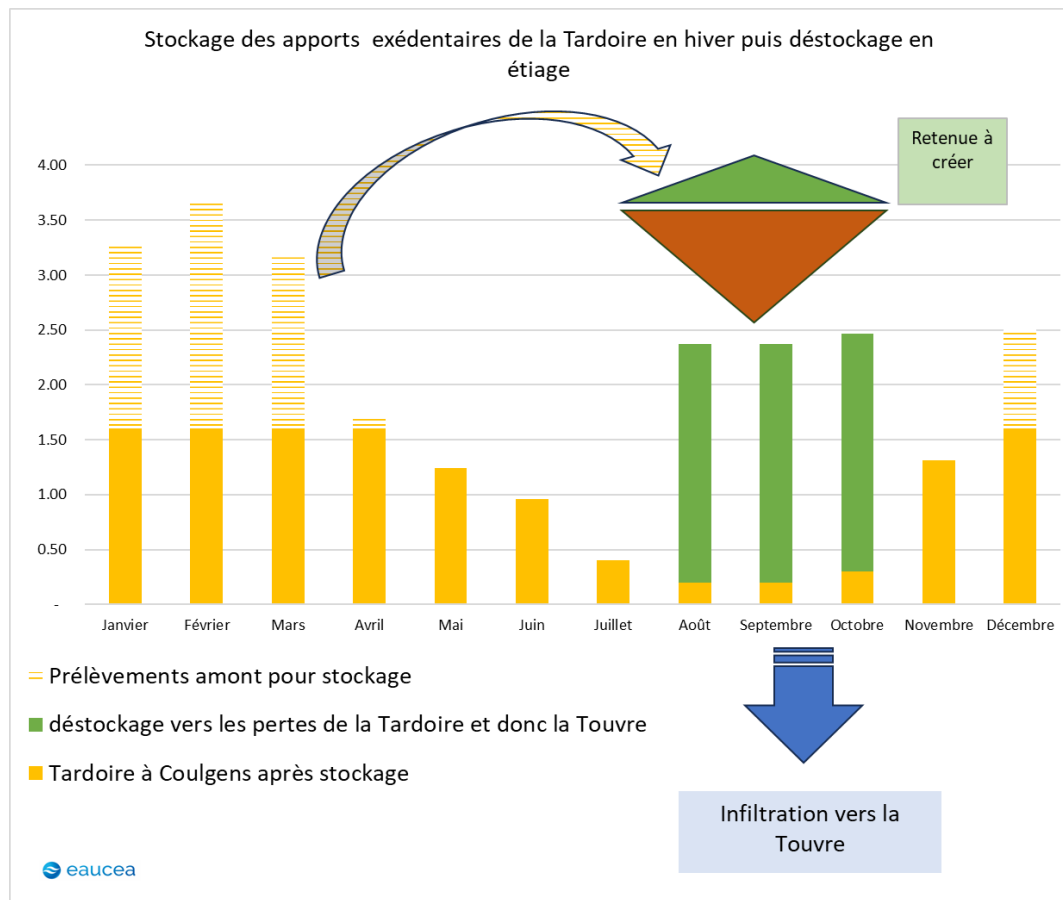


Figure 8 Soutien des débits en étiage de la Tardoire et donc de la Touvre

1.5. Solutions existantes dans la littérature

1.5.1. Notion de gestion active d'un aquifère

La notion de gestion active renvoie à la manière dont on peut optimiser l'exploitation d'un aquifère (karstique ou autre) par des actions contrôlées et maîtrisées, ceci afin de répondre à une demande en eau (souvent temporaire, en période d'étiage) qu'il ne serait pas possible de satisfaire par les voies strictement naturelles.

Le terme de gestion active a été introduite par le professeur Jacques AVIAS en 1995 par l'étude de la source du Lez dans l'Hérault.

Plusieurs formes de gestion active des ressources en eau existent en France et dans le monde. L'une des plus utilisées et connues consiste à alimenter artificiellement un aquifère avec des eaux superficielles (rivière, canaux) et ensuite récupérer cette eau lorsque la demande le nécessite et dans l'optique d'une utilisation différée.

Cette gestion active des ressources en eau est très souvent pratiquée pour plusieurs objectifs : alimentation de champ captant, régulation des débits des cours d'eau, amélioration de la qualité des nappes, protection des aquifères côtiers contre l'intrusion d'eau salée, restauration d'une nappe surexploitée par excès de pompage, stockage des eaux pour une utilisation différée...

L'application du principe de gestion active exige une connaissance appropriée du fonctionnement de l'aquifère et des contraintes environnementales. Les impacts généraux (sur les usages et les milieux) et leur irréversibilité doivent impérativement être identifiés au préalable et maîtrisés.

1.5.2. Solutions existantes de gestion active du karst

Globalement, trois familles de solutions sont actuellement étudiées ou en fonctionnement en France :

- **des solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de la vidange naturelle du karst**, grâce à des aménagements intra ou extra karst. Il s'agit notamment de « barrages » placés soit en aval de résurgences karstiques (dans le but de rehausser le niveau et/ou ralentir les vitesses de sortie) ou à l'intérieur des drains karstiques (voir cas A sur la figure 9). L'un des exemples les plus connus est le barrage de la source sous-marine de Port-Miou.
- **des solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst**. Il s'agit ici d'actions locales permettant d'augmenter la recharge dans le karst. Parmi ces actions, on peut citer :
 - La recharge maîtrisée des aquifères consiste à utiliser la capacité naturelle de stockage d'eau de certains aquifères pour constituer des réserves supplémentaires en sous-sol à partir de l'infiltration maîtrisée d'une eau prélevée dans le milieu superficiel (cours d'eau ou plan d'eau) en période d'abondance. Le volume accru de ressource disponible constitué est alors utilisable en période de basses eaux pour divers objectifs (soutien d'étiage, protection contre les intrusions salines, barrières hydrauliques...). L'eau injectée, dont la qualité doit être compatible avec les objectifs de qualité et d'état des eaux souterraines, est généralement prélevée localement dans les cours d'eau lorsque la ressource est abondante (hautes eaux). On peut citer le projet R-Garonne visant à utiliser l'eau du canal de Saint-Martory en période hivernale afin qu'elle soit disponible pour alimenter la Garonne en période d'étiage.

- Les projets de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) qui consistent à réduire de 50 % le rythme d'artificialisation et de consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers. L'idée est de recréer des zones d'infiltration diffuse ou ponctuelle ;
- La restauration et la conservation des zones de pertes en rivière ;
- **des solutions de surexploitation des systèmes karstiques** (voir cas B ou C sur la figure 9). Face à la complexité des systèmes karstiques et à la diversité de leur fonctionnement, les hydrogéologues ont développé des outils permettant d'identifier les zones les plus productives et d'évaluer convenablement leurs ressources et leurs réserves. L'idée est d'exploiter activement le réseau karstique en saison sèche de manière à pouvoir satisfaire la forte demande estivale en eau, quitte à faire baisser les niveaux au-delà de ce qui est généralement admis, pour ensuite les laisser se re-remplir avec l'arrivée des pluies d'automne. Dans certains cas, l'avantage est également de réduire fortement le risque ou la période de crue en automne. L'un des exemples le plus connu est l'exploitation du système karstique de la source du LEZ au nord de Montpellier. Ce captage est considéré comme un modèle mondial.

1.5.3. Solution fondée sur la nature sur le bassin d'alimentation du karst

Ces solutions sont définies comme *des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité.*

Elles se déclinent en trois types d'actions, qui peuvent être combinées dans les territoires :

- La préservation d'écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique ;
- L'amélioration de la gestion d'écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines ;
- La restauration d'écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes.

Afin d'être efficaces et de produire des résultats significatifs, ces solutions doivent être mises en œuvre à une échelle spatiale suffisante et sur une échelle de temps long. En effet, les bénéfices générés par la gestion durable ou la restauration des milieux naturels notamment aquatiques ne sont pas toujours perceptibles de façon immédiate et les actions mises en place doivent prendre en compte une superficie permettant un fonctionnement optimal des écosystèmes.

D'après l'ensemble des experts interviewés dans cette étude, aucun projet de ce type n'existe en France dans les secteurs karstiques.

1.5.4. Méthodologie d'études

Le principe de gestion active exige une connaissance appropriée et détaillée du fonctionnement de l'aquifère karstique et des contraintes qui l'entourent (usage de l'eau, recharge de l'aquifère, justification du déstockage...). Ce principe est rappelé par le guide n°3 de l'Agence de l'Eau RMC de 1999 (réf 99-010-RE) intitulé : « connaissance et gestion des ressources en eau souterraines dans les régions karstiques ». Il rappelle les étapes d'étude des systèmes karstiques à travers 3 étapes :

Etape 1 de caractérisation

Cette phase a pour but de définir les caractéristiques de la zone noyée à partir de l'étude des débits, de la piézométrie, des traçages artificiels... Le but est de reprendre les études existantes (voir synthèse des données) afin de démontrer l'existence de réserves exploitables.

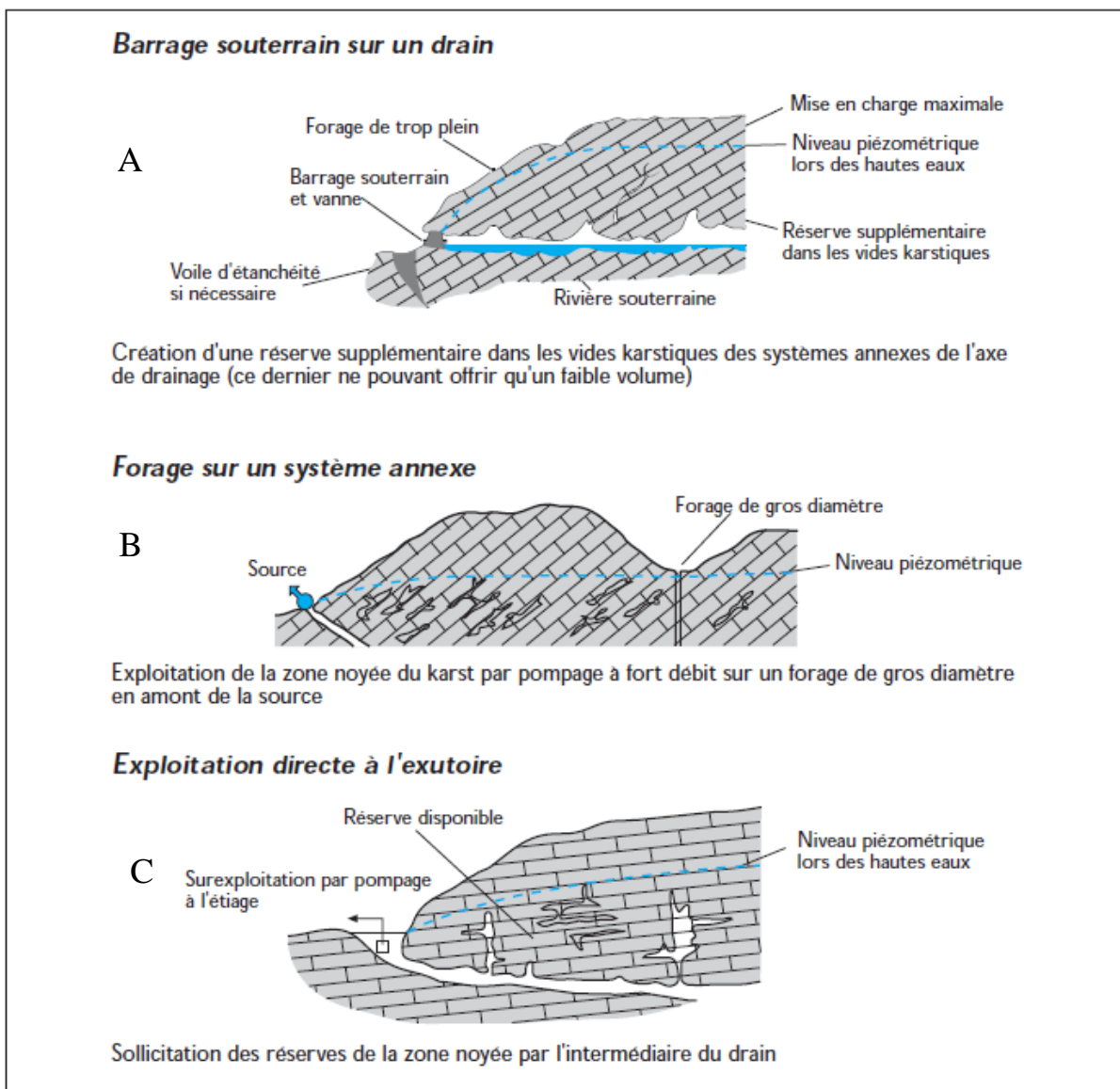


Figure 9 : Typologie de gestion karstique du karst

Cette phase est souvent complétée par une analyse des séries temporelles de débit et/ou de piézométrie : analyse des hydrogrammes de décrue et de tarissement, analyses des hydrogrammes à l'échelle annuelle ou pluriannuelle, des conditions d'écoulement (libre, en charge, en zone d'infiltration) et des temps de séjour.

Etape 2 de démonstration

Elle a pour but de définir le mode d'exploitation le mieux adapté à la structure du système étudié, selon que le système possède des réserves mobilisables ou non, un conduit pénétrable...

Etape 3 d'évaluation ou d'expérimentation

Elle a pour but de fournir tous les éléments nécessaires pour l'aide à la décision dans le but de gérer durablement la ressource en eau du système karstique : impacts des prélèvements en volume et en extension géographique, impacts sur la qualité, risques, réseau de surveillance (débits, niveaux et qualité).

1.6. Approche bibliographique et retours d'expérience (voir Annexes I et II)

Le tableau 3 résume l'ensemble de la synthèse bibliographique réalisée au cours de cette étude (voir Annexes I et II) à travers la compilation des retours d'expériences existants et des entretiens avec les experts.

1.7. Synthèse des entretiens effectués avec les experts

Les entretiens avec les experts identifiés dans le cadre de la présente étude ont permis d'aborder les différentes solutions envisagées et de retenir les points suivants :

- **Solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de la vidange naturelle du karst**
 - **Solutions de type barrage intra-karst (obstruction partielle ou total des conduits)**
 - De nombreux exemples de barrages intra-karst existent en Chine. Malheureusement, ces travaux de barrages de rivières karstiques ont été menés sans études préalables et sans expérimentations, et ont engendré de nombreux problèmes et échecs (débordements, fuites latérales). En l'absence de consensus de nombreux cas ont également été étudiés sans réalisation ultérieure (notamment en Ex-Yougoslavie). Les risques identifiés sur ces solutions sont les décolmatages karstiques, les effondrements ou la création de nouvelles sources.
 - Les solutions de barrages sur les conduits sont difficilement réversibles avec des risques de fuites latérales ou de nouveaux trop-pleins.
 - Des exemples existent en France, certains avec succès (Dardennes pour la ville de Toulon) certains non (Port-Miou) dans des contextes géologiques assez différents. Des expérimentations ont été réalisées et d'autres sont projetées.
 - Une des solutions proposées propose de rétablir la situation d'avant 2005 (effondrement dans la source du Bouillant qui a conduit à l'élargissement d'une étroiture) avant d'aller plus loin (remettre un bloc béton par exemple). La géométrie de l'exutoire pourrait être favorable à la mise en place d'hydrolienne réduisant la section de passage et générant des pertes de charges.
 - **Solution de type barrage extra-karst (seuils/diguettes)**
 - L'avantage est que le phénomène de ralentissement des écoulements à l'aval immédiat des résurgences a déjà été observé naturellement (herbiers).
 - Les surcreusements (action inverse de la rehausse) sur le lit de la Touvre auraient participé à une hausse de la vidange du système.
 - La solution présente a priori une bonne facilité de réversibilité, seuil amovible par exemple.
 - Hydrauliquement, l'effet sera le même qu'un barrage sur le drain avec les mêmes contraintes (débordement, contournement).

- **Solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst**
 - Ces solutions s'inscrivent dans la logique du futur et paraissent intéressantes à travailler. Des exemples de recharge artificielle existent dans différents pays notamment au Liban. L'objectif recherché est de protéger les aquifères littoraux des entrées d'eau saline.
 - L'idée est de favoriser l'infiltration lente plutôt que l'infiltration rapide (pertes), c'est-à-dire identifier des zones d'infiltration peu rapides et de profiter du retard introduit pour soutenir l'étiage. L'eau pourrait provenir de stockages hivernaux sur la zone de socle (par exemple avec la création barrage, l'utilisation d'étangs récréatifs existants, de carrières...), restitués à l'étiage. A étudier cependant le phénomène d'évaporation et l'altération de la qualité des eaux (nitrates, pesticides).
 - Certains estiment que les risques de débouillage¹ sont forts, d'autres qu'utiliser l'infiltration lente limitera les risques.
 - La quantification des bénéfices sur le système de la Touvre restera difficile et une expérimentation est indispensable. L'adaptation de la méthode RISKE à cet objectif paraît intéressante pour identifier les zones favorables à l'infiltration.
 - Le volume stocké dans le système de la Touvre est tellement grand qu'il faudra un volume conséquent pour avoir un gain significatif.
- **Solutions basées sur la surexploitation des aquifères karstiques**
 - Le surpompage doit permettre d'assurer et restituer le débit AEP (forte dépendance) et le débit réservé à l'aval (ce qui imposera un débit de pompage conséquent).
 - La question du positionnement du pompage est posée.
 - Quid de la reconstitution des réserves et de la recharge après avoir sur-sollicité l'aquifère au-delà de ce qui est généralement admis ? L'aspect climatique est important, pour le Lez, 2 épisodes cévenoles (100 mm, d'après J-C. MARECHAL) suffisent à recharger le système. Les étiages 1975/1976 sont cités comme référence pour la Touvre. Le changement climatique est un facteur de risque sur la recharge hivernale.
 - Une expérimentation avec un test de pompage paraît indispensable (sur le drain ou sur les réserves latérales). Mais le débit devra être très important pour percevoir un impact sur les piézomètres. Sur le Lez, l'influence se fait sentir sur plusieurs kilomètres, mais les débits sont très forts (30 m de rabattement à la source, 35 Mm³ prélevés sur 3 à 6 mois)

¹ Un débouillage correspond à un départ de matière (argile, limon, sable...) d'un conduit karstique remblayé, lorsque les terrains sont soumis à des variations du niveau piézométrique

- L'avantage de cette solution est aussi de limiter les premières crues du cycle hydrologique.
- L'abaissement du plan d'eau sous le niveau de l'exutoire fait entrer obligatoirement dans une zone à risque de déséquilibre hydraulique du karst de la Touvre avec des effets non prévisibles à ce stade.

Tableau 3 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur le retard et/ou ralentissement de la vidange naturelle du karst



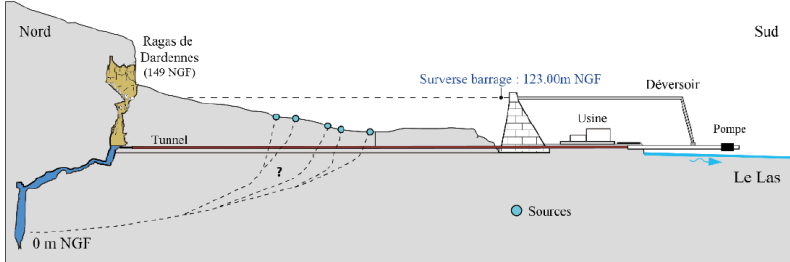
N°	Projet connu	Réf bibliographique (voir Annexe 1)	Retours d'expérience
<p>Solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de sa vidange naturelle du karst</p>	<p>Il existe en France plusieurs typologies d'ouvrages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les ouvrages barrant un drain karstique ; • Les ouvrages extérieurs barrant des émergences karstiques <p>L'utilité de ces barrages est assez variable mais on retrouve trois grands usages :</p> <p><u>1°) Les ouvrages visant à créer de la force motrice (moulins, centrales hydroélectriques)</u></p> <p>On citera le barrage EDF de la salle de la Verna (Pierre St Martin 64), la source de la Pescalerie (Quercy - 46), le Goul de la Tannerie en Ardèche, la résurgence de la Vis (34). Un des exemples les plus anciens est celui de la Sorgues (barrage EDF) qui a été détruit à la première crue importante. L'un des plus médiatisés est celui de Salles la Source dans l'Aveyron (Ref 4).</p> <p><u>2°) Les ouvrages utilisés pour l'eau potable</u></p> <p>Les exemples sont peu nombreux mais on peut citer le barrage de la Tride, de la Tirounère (66), ou de St Géry (82).</p> <p>Le barrage le plus important en France à usage AEP reste celui des sources de Dardennes, dont le Ragas constitue l'exutoire de trop-plein (plongé à -150 m de profondeur). Ces sources émergent au fond d'un barrage artificiel mis en service en 1912 afin d'obtenir une réserve pour l'alimentation en eau potable de la ville de Toulon (Voir figure)</p> <p><u>3°) Les ouvrages utilisés pour repousser le biseau salé (Port Miou et Croatie)</u></p> <p>On citera les projets expérimentaux de Luceram et Coaraze (Alpes-Maritimes) de création d'une réserve d'eau souterraine par obturation d'une source karstique</p>	<p>Projet DARDENNE https://www.karsteau.fr/karst/dardennes.html</p> <p>Luceram et Coaraze (Alpes-Maritimes) Annexe 1 référence n°12 et 17</p>	<p>Sur les barrages karstiques français, on a très peu de retours d'expériences en général car les ouvrages sont anciens. A noter les expériences douloureuses à l'Etranger (Chine, Croatie) où des barrages créés sans réflexions amont ont engendré des perturbations importantes du massif karstiques (création de trop-pleins, mises en charge soudaines...).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Barrage EDF de la Verna Goul de la Tannerie (Ardèche) Photos Philippe CROCHET</p>  <p>Barrage AEP de DARDENNE (source JOUVES)</p>

Tableau 4 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst





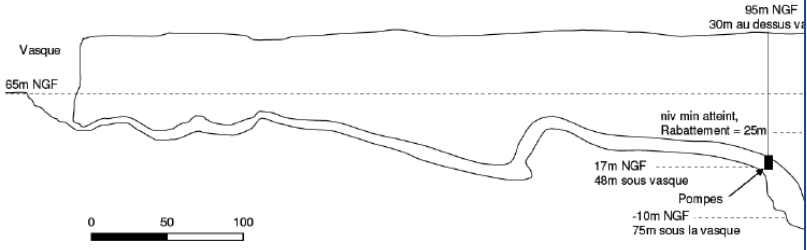
N°	Projet connu	Réf bibliographique (voir Annexe 1)	Retours d'expérience
<p>Solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst</p>	<p>D'après la bibliographie et les dires d'experts, aucun projet de recharge maîtrisée d'un aquifère karstique n'a été mené en France.</p> <p>Plusieurs exemples sont connus en France d'aménagement de pertes dans le but de ralentir/stocker l'écoulement en amont ou de répartir le débit en aval.</p> <p>On peut citer :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'aménagement des pertes du Doubs, • l'aménagement des pertes du Trou du Souci (Aveyron – syndicat SMBV2A). La rivière Serre se divise en deux bras sur la commune de Saint Martin de Lenne. L'un de ces bras continue à couler dans la vallée de la Serre jusqu'à rejoindre l'Aveyron, l'autre disparaît, via une perte karstique au lieu-dit « le Trou du Souci ». Après un long trajet souterrain, l'eau ressort, à 1 500 m de là, à la résurgence des Douzes et forme le ruisseau de Glassac, avant de se jeter dans le Lot. Un ouvrage a été créé et permet de répartir 2/3 du débit pour la Serre et 1/3 pour la perte, jusqu'à la capacité maximum de la perte du Trou du Souci. Cette répartition doit se faire sans intervention humaine ». • l'aménagement de la perte du lac des Rives (Larzac - Parc Naturel Régional des Grands Causses) <p>On cite également quelques projets d'aménagements de ce type en Bosnie et Slovénie</p>	<p>Annexe 1 référence n°37 pour le Trou du Souci</p>	<p>L'ensemble des acteurs mentionne la difficulté de mise en œuvre de ces aménagements des pertes pour retarder l'infiltration (aménagements délicats dans le lit de ruisseaux et souvent peu gérables) et l'acceptation sociale très délicate.</p> <p>En cas de création de plan d'eau, se rajoute la problématique de l'évaporation importante notamment en période estivale.</p> <div style="text-align: center;">  <p>Trou du souci dans l'Aveyron</p> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Lac des rives (à droite) et barrage de la perte (à gauche)</p>

Tableau 5 : Références bibliographiques pour les solutions basées sur la surexploitation des aquifères karstiques

N°	Projet connu	Réf bibliographique (voir Annexe 1)	Retours d'expérience
<p>Solutions basées sur la surexploitation des aquifères karstiques</p>	<p>Le seul projet français connu à ce jour est celui de la gestion active de la source du LEZ à Montpellier.</p> <p>Le principe consiste à prélever l'eau souterraine directement dans le drain karstique principal alimentant la source du LEZ, à une cote inférieure à celle-ci (voir Illustration).</p> <p>Ce mode de gestion permet ainsi d'exploiter les eaux souterraines de l'aquifère par pompage en période de basses eaux, avec un débit supérieur au débit d'étiage de la source. On peut de cette manière solliciter les réserves de l'aquifère, tout en assurant leur reconstitution lors des périodes automnale et hivernale.</p>  <p>Source du Lez (photo P. Crochet)</p>	<p><u>Voir Annexe 1 références</u></p> <p>Gestion active de l'exurgence karstique de la source du Lez</p>	<p>Cette surexploitation engendre un rabattement important de la source voire son assèchement total. Le pompage permet donc de combler les besoins en eau AEP mais également le débit réservé en aval (220 l/s).</p> <p>L'exploitation est conditionnée par la hauteur de rabattement et une cote NGF à ne pas dépasser</p> <p>Ce principe a été calé sur un modèle prédictif, intégrant les effets du changement climatique. La surveillance du système est assurée par une vingtaine de piézomètres</p> <p>La différence avec la Touvre est que le BAC de la source du LEZ est très peu impacté par d'autres usages notamment agricoles.</p>  <p>Réseau karstique de la source du Lez et dispositif de captage (source Fleury BRGM 2009).</p>

1.8. Synthèse des entretiens effectués avec les acteurs du territoire

Les entretiens avec les acteurs du territoire (voir Annexe III) concernant la gestion active du karst de la Rochefoucauld mettent en évidence plusieurs enjeux environnementaux, techniques, et sociaux. Les acteurs impliqués, notamment les autorités de gestion, les syndicats de rivières, les associations de protection de l'environnement, et les acteurs économiques, expriment des points de vue parfois divergents mais souvent complémentaires.

1.8.1. Contexte, objectifs et bénéficiaires du projet

Le projet de gestion active du karst vise à répondre aux défis liés à la régulation des débits de la Touvre, particulièrement en période d'étiage, pour sécuriser l'alimentation en eau potable (AEP) et préserver les écosystèmes locaux. L'idée centrale est de contrôler le niveau d'eau pour optimiser le soutien d'étiage, en créant éventuellement des seuils ou en explorant d'autres aménagements ou processus.

Les acteurs se posent collectivement la question de l'opportunité du projet (pour qui ?) et des volumes recherchés en conséquence. Pour la plupart, il apparaît que les enjeux soient essentiellement pour l'aval de la Charente. En effet :

- Pour l'alimentation en eau potable de Grand Angoulême : aucun besoin de volume supplémentaire n'est exprimé, car la ressource n'est aujourd'hui pas en tension y compris en étiage très sévère et qu'il y a peu de perspective d'augmentation des besoins au regard du changement climatique et de l'augmentation de la population. A noter qu'un projet de sécurisation de la ressource est tout de même intéressant d'un point de vue de confort d'exploitation.
- Pour les piscicultures sur la Touvre : aucun besoin de volume supplémentaire n'est exprimé, les personnes interrogées préférant adapter leur activité à la ressource disponible et aux contraintes environnementales existantes.
- Pour l'irrigation sur le karst : il y a aujourd'hui très peu de restrictions des prélèvements dans le karst, pourtant, seulement la moitié du « volume de gestion » inscrit dans l'arrêté-cadre est prélevée. Le karst est le secteur où l'adéquation entre consommation réelle et besoin théorique est la meilleure. La volonté de la profession est de maintenir l'agriculture actuelle, et pas de la développer. Sur la Charente aval : les prélèvements sont déjà (fortement) restreints par une gestion conjoncturelle et des volumes prélevables. De manière générale et au vu du contexte, devenir irriguant est peu attractif et il y a peu, voire pas, de nouvelles demandes chaque année.

Aussi, la question de la solidarité « aval-amont » est centrale, puisque l'intérêt du pilotage de la vidange du karst est principalement celui de l'aval.

La notion de « sécurisation » des usages doit être clarifiée, et des interrogations se posent sur le protocole de suivi des bénéfices du projet, et sur la nécessité d'une adaptation des modalités de gestion des prélèvements en conséquence.

1.8.2. Enjeux environnementaux

Les syndicats de rivières (SyBRA, SyBTB, SYMBA-BT) soulignent l'importance de préserver la qualité des rivières (Touvre, Bandiat, Tardoire) et des résurgences.

Les associations environnementales expriment des réserves similaires, insistant sur le fait que l'optimisation du karst ne doit pas devenir un prétexte pour accroître l'exploitation de l'eau, mais bien pour assurer la durabilité des écosystèmes. Pour elles, seules des problématiques AEP et milieux sont légitimes pour initier le projet, aux vues de leur perception de son impact sur la rivière Touvre. Elles mettent en avant la nécessité de protéger les espèces endémiques et de garantir la qualité thermique et chimique des eaux de la Touvre, essentielle pour les écosystèmes aquatiques et pour l'AEP.

Pour ces deux entités (syndicats de rivières, associations environnementales) et pour la fédération de pêche, il est important de maintenir l'équilibre sédimentaire de la rivière Touvre. La problématique de la dégradation morphologique/sédimentaire et la disparition des herbiers, dont les causes sont relativement inexplicables, est assez cruciale, et c'est un sujet qui est revenu lors de plusieurs entretiens. On note cependant que le constat d'une disparition complète et irréversible des herbiers n'est pas partagé par tous (exemple de l'entretien avec les pisciculteurs), et des cycles sont observés.

Parmi les solutions envisageables, celles basées sur la nature (renaturation, réflexions sur les plans d'eau en amont ...) suscitent des préoccupations collectives quant à la complexité de leur mise en œuvre et leur efficacité. Des doutes existent également sur leurs capacités à fournir des volumes d'une ampleur suffisante.

1.8.3. Perspectives socio-économiques

Les professionnels de l'agriculture et les pisciculteurs font écho à ces préoccupations tout en insistant sur la nécessaire viabilité économique des solutions. Ils craignent de forts investissements pour de faibles bénéfices hydrologiques.

Les agriculteurs, bien qu'intéressés par une gestion optimale du karst pour sécuriser leur activité, s'opposent généralement à des mesures drastiques et/ou très ambitieuses comme l'effacement des plans d'eau (plusieurs milliers sur le domaine granitique). Ils insistent sur la nécessité d'interventions pilotables et réversibles.

Les pisciculteurs partagent cette prudence, indiquant leur crainte de voir la qualité des eaux fluctuer avec les aménagements envisagés, fluctuations auxquelles ils ne seraient pas en capacité de s'adapter. Ils s'inquiètent également de l'impact potentiel des fluctuations rapides sur la stabilité des sédiments et des débits, ce qui pourrait nuire à leurs activités.

1.8.4. Patrimoine et acceptabilité sociale

Les élus locaux et les acteurs de la conservation soulignent la nécessité de respecter le patrimoine paysager et culturel de la région, en particulier autour des sources de la Touvre, classées en site Natura 2000.

La DREAL et l'Architecte des Bâtiments de France insistent sur la conservation du caractère pittoresque et historique du site, exprimant des réticences à toute solution visible ou qui altérerait l'esthétique des lieux.

Les élus locaux, tout en reconnaissant les enjeux liés à la gestion de l'eau, demandent des garanties pour éviter tout risque accru d'inondations et pour préserver la stabilité des berges. Ils insistent aussi sur l'importance que l'ensemble des réflexions demeurent transparentes, en lien étroit avec les parties prenantes, et sur l'importance de tenir les riverains informés et rassurés.

1.9. Conclusion et principes retenus des entretiens et de l'analyse bibliographique

Un consensus se dessine autour de la nécessité d'une approche intégrée qui prend en compte les spécificités écologiques et les besoins socio-économiques du territoire.

La réversibilité des solutions et leur impact environnemental à long terme restent des priorités pour l'ensemble des parties prenantes.

Bien que tous reconnaissent l'importance de sécuriser les ressources en eau pour les usages actuels et futurs, des divergences subsistent quant aux méthodes et à l'ampleur des aménagements (amont vs aval, fondée sur la nature vs aménagements). La clarification du niveau d'ambition du projet (quel volume supplémentaire cherche-t-on ?), en lien avec l'identification des bénéficiaires (milieux ? AEP en Charente-Maritime ?), pourrait permettre à certains acteurs de départager des solutions, ou tout du moins d'en justifier certaines.

Une coordination étroite entre les divers acteurs, un soutien financier adéquat et une communication transparente apparaissent comme les éléments clés pour assurer l'acceptation et le succès de ce projet de gestion active du karst.

Les principes retenus par les experts hydrogéologues sont les suivants :

- Les solutions doivent être réversibles à tout moment,
- Elles doivent faire l'objet d'une expérimentation, avec possibilité d'un arrêt rapide en cas de constats de dysfonctionnement pour limiter les risques (cahier des charges avec multiples scénarios possibles pour s'adapter rapidement),
- Elles doivent être mises en œuvre de manière progressive. Il est notamment proposé que dans un premier temps, la solution reste dans les plages de variation connues du système karstique, en restant dans la limite des plus hautes eaux connues.
- La connaissance hydrochimique du système karstique de la Touvre est reconnue comme très faible et mériterait une action (méthode pouvant renseigner notamment sur la dynamique de stockage (profonde, latérale) ;
- A part la turbidité, il n'est pas identifié de risque sur la qualité des eaux pour les solutions étudiées (importance du volume et de la capacité de dilution du karst) ;
- L'importance de la collecte et de la mise en commun des données est soulignée par les experts connaissant bien le système de la Touvre.

1.10. Synthèse des solutions techniques retenues

Suite à l'approche bibliographique et les retours d'expériences des entretiens, 7 solutions ont été identifiées. L'idée a été de proposer des solutions assez hétérogènes (dans leurs caractéristiques et leurs impacts), dans leur temporalité (impact en basses eaux ou hautes eaux) et dans leur spatialisation (bassin versant amont, Grand Karst, partie aval des résurgences – voir figure 10).

Les solutions retenues sont :

Typologie	Solution	Synthèse
Solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de la vidange naturelle du karst	Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources à l'aval immédiat des résurgences	Il s'agit de reprendre l'idée proposée dans le cadre du projet «Diguette », qui visait à surélever le fil d'eau des sources afin de mettre en charge la zone noyée du karst, au moyen de deux diguettes amovibles (Bouillant-Dormant et Font de Lussac).
	Solutions fondées sur la nature à l'aval immédiat des résurgences	Cette idée assez ancienne, est issue d'observation empirique reliant un effet de frein hydraulique et d'augmentation du niveau du plan d'eau liée à la pousse saisonnière (printemps et été) d'un important herbier. A l'inverse le faucardage régulier organisé par les pisciculteurs en dégagant des couloirs libres, guidant les écoulements vers les prises d'eau, se traduisait par un abaissement du niveau amont. Cette observation a même été interprétée comme une action indirecte sur la vidange du karst.
	Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant de la Tracherie	L'idée est de proposer l'augmentation du niveau d'eau très en aval des sources notamment par la rehausse de seuils existants.
	Solution fondée sur l'obstruction des conduits karstiques	L'idée est d'obstruer partiellement les conduits karstiques, à l'aide de blocs rocheux ou de matériaux granuleux. Plusieurs effondrements ont été constatés dans le Bouillant, augmentant ainsi la largeur de la section d'écoulement et contribuant à une modification du fonctionnement hydraulique des sources.

Tableau 6 : Synthèse des solutions basées sur le retard et/ou le ralentissement de la vidange du karst

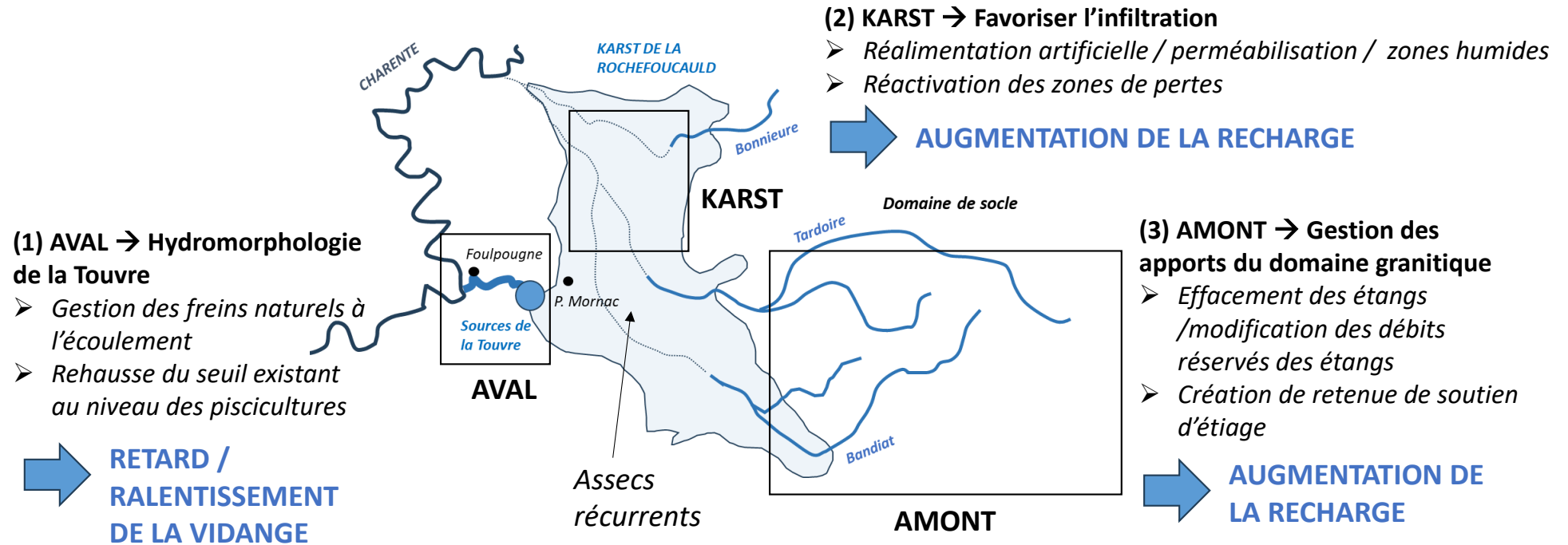
Typologie	Solution	Synthèse
Solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst	Solution fondée sur la nature sur le bassin d'alimentation du karst en favorisant l'infiltration des eaux	<p>Une première solution vise à travailler sur l'aménagement de pertes, afin de dévier une partie du flux d'eau s'écoulant en hautes eaux vers des zones plus capacitives</p> <p>Une deuxième solution consiste à utiliser les anciennes gravières situées rive gauche de la Tardoire comme zone d'infiltration diffuse des eaux. Compte de la superficie de ces anciennes gravières (plusieurs ha) et de leurs stockages prévisionnels (entre 500 000 et 1million de m³), ces zones pourraient constituer des zones tampons importantes d'eau superficielle, qui viendraient réalimenter artificiellement le système de la Touvre en été.</p>
	Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique	<p>Parmi les solutions identifiées, un des leviers consiste à augmenter la recharge du karst en utilisant cette zone d'alimentation en amont du système karstique. Il s'agit de pouvoir peser significativement sur le régime hydrologique des rivières Bandiat, Tardoire et éventuellement Bonniere dans le domaine du socle, avant qu'elles ne se perdent dans le système karstique. On note que cette région cristalline est également marquée par une importante densité de plan d'eau.</p>

Tableau 7 : Synthèse des solutions basées sur l'augmentation de la recharge du karst

Typologie	Solution	Synthèse
Solution fondée sur la surexploitation de l'aquifère	Solution fondée sur la surexploitation du karst	L'idée est de proposer des solutions de pompage dans l'aquifère, dans des zones productives et peu connectées au flux en étiage.

Tableau 8 : Synthèse des solutions basées sur la surexploitation de l'aquifère karstique

Figure 10 : Spatialisation amont vs karst vs aval des solutions



2. Etape 2 : Analyse des solutions techniques identifiées

2.1. Principes d'analyse des solutions

Chaque solution a été étudiée en prenant en compte les critères suivants :

- capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (soutien du débit du fleuve Charente via les apports de la Touvre) et bénéfices potentiels (volume stocké dans le karst ...),
- faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...),
- influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins),
- niveau d'artificialisation (génie civil),
- facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...),
- coût,
- impacts sur la qualité de l'eau et sur la vulnérabilité du captage AEP,
- impacts sur les autres usages en aval (piscicultures, industriel) et en amont (forages),
- impacts géotechniques (risques d'effondrements, débouffage),
- impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, ruisseau de la Touvre)
- impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme (comptabilité avec les plongées souterraines) et le patrimoine (vestiges archéologiques) ;
- contraintes réglementaires.

Cinq grands principes ont cependant été retenus pour la faisabilité de chaque solution. Ils sont classés par ordre d'importance dans le choix des solutions :

Principe 1	Non impact sur l'usage AEP	Les solutions proposées ne devront pas impacter l'usage en eau potable actuel sur la source du Bouillant
Principe 2	Non impact sur les autres usages notamment en aval	Les solutions proposées ne devront pas impacter les usages actuels notamment sur le ruisseau de la Touvre (pisciculture, industries)
Principe 3	Réversibilité des solutions	La mise œuvre de chaque solution doit suivre un processus réversible et adaptatif pour proposer un outil permettant d'améliorer la connaissance de la réponse du karst à la mobilisation d'une tranche supérieure comme volume de stockage dynamique.
Principe 4	Rapport coût/bénéfices	Chaque solution devra être économiquement acceptable et devra présenter un rapport coût/bénéfice intéressant
Principe 5	Limitation de l'impact paysager et patrimonial	Le site des sources de la Touvre est un lieu patrimonial très apprécié des riverains et des charentais. Chaque solution devra limiter au maximum l'impact paysager et patrimonial
Principe 6	Acceptabilité sociale	Consensus des organismes et entités non étatiques dans l'acceptation du projet

Tableau 9 : Principes retenus à partir des retours d'expériences et de l'analyse bibliographique

2.2. Solutions fondées sur la nature à l'aval immédiat des résurgences : restauration des herbiers et restauration hydromorphologique de la Touvre

2.2.1. Principes et historique de la solution étudiée (voir Annexe IV)

Les solutions fondées sur la nature à l'aval des résurgences de la Touvre incluent deux actions distinctes :

- La gestion pilotée des herbiers situés à l'aval des sources de la Touvre et à l'amont du seuil de la Tracherie. L'idée ici est de gérer la croissance et le faucardage de la végétation aquatique pour ralentir les écoulements de façon naturelle.
- La restauration hydromorphologique de la rivière Touvre, dont l'unique objet identifié dans ce contexte est la recharge granulométrique de la section sources – seuil de la Trachée.

[Une analyse détaillée de ces solutions est présentée dans le cadre de l'Annexe IV : Piloter la vidange par l'aval.](#)

Dans les deux cas, il s'agit d'actions visant à déphaser la période vidange du karst en jouant sur le niveau du fil d'eau de la Touvre à l'aval des sources, via des leviers d'actions différents :

La gestion des herbiers aquatiques :

Cette solution consiste à favoriser les herbiers (notamment Callitriche et Berle), dont la croissance crée un effet de frein hydraulique, augmentant le niveau de l'eau et limitant l'écoulement rapide. Un pilotage contrôlé de la croissance des herbiers pourrait aider à stabiliser le niveau d'eau, puis le fauchage permettrait de piloter la vidange du karst à une période contrôlée. On note cependant que les impacts précis de cette végétation sur l'écoulement restent encore peu étudiés.

L'historique de la restauration des herbiers dans la Touvre s'inscrit dans une longue observation empirique de la dynamique végétale et de son impact hydraulique. Au fil des décennies, les acteurs locaux, dont les pisciculteurs, ont remarqué que la croissance saisonnière des herbiers, particulièrement au printemps et en été, avait un effet de "frein hydraulique" sur l'écoulement de la rivière (Figure 11). Ce phénomène entraînait une augmentation du niveau d'eau, ce qui soutenait indirectement le débit de la Touvre en ralentissant la vidange du karst de La Rochefoucauld pendant les périodes d'étiage.

À l'inverse, le fauchage régulier des herbiers, souvent pratiqué par les pisciculteurs pour libérer des couloirs d'écoulement, abaissait le niveau amont, accélérant ainsi la vidange de l'eau. Cette gestion des herbiers était perçue comme une méthode indirecte de régulation du débit de la Touvre et de soutien au niveau de l'eau en aval, bien que les effets exacts sur le débit du karst ne soient pas complètement quantifiés.



Figure 11 : Photographie illustrant l'impact des herbiers aquatiques de la Maillerie sur les écoulements. Toute la section est encombrée (source Eaucea).

La restauration hydromorphologique :

Cette approche vise à préserver et optimiser la dynamique alluvionnaire pour augmenter le niveau d'eau, en phase d'étiage et de tarissement. Sur la Touvre, caractérisée par un lit large et peu profond, les interventions consistent en des techniques comme la recharge granulométrique pour maintenir le profil naturel et stabiliser les sédiments. Bien que cette restauration puisse favoriser un lit stable, elle

nécessite une évaluation rigoureuse des apports de matériaux et de l'impact potentiel sur l'écosystème.

On note le fait que le lit de la Touvre sur la section considérée ne semble pas aujourd'hui impacté par l'action humaine. Plus qu'une restauration hydromorphologique, l'action correspond à une action anthropique sur le site pour répondre aux besoins de soutien d'étiage de la Touvre sur la Charente.

2.2.2. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

2.2.3. Synthèse de la solution

L'analyse synthétique des deux sous-solutions renvoie à des conclusions distinctes :

La gestion des herbiers aquatiques :

L'impact de la solution ne peut pas à ce stade s'évaluer en termes d'augmentation du fil d'eau de la Touvre, et encore moins en termes de volumes déphasés. L'impact sur la hauteur d'eau est cependant jugé faible (décimétrique au maximum, à comparer avec les 0.5m recherché pour la solution de surélévation à l'aval immédiat des sources étudié plus loin).

Le succès de cette solution des herbiers reste incertain en raison de facteurs environnementaux multiples. Depuis environ 20-30 ans, les acteurs locaux, dont le syndicat de la rivière et les pisciculteurs, ont observé une réduction notable de certains herbiers. Les causes de cette réduction ne sont pas encore bien comprises, mais pourraient inclure des facteurs comme la qualité de l'eau, les conditions hydrologiques, la concurrence entre espèces et les effets sanitaires sur les plantes aquatiques. Ainsi, si l'action de vidange (le faucardage) semble pouvoir être facilement pilotée et gérée, cela est moins vrai pour la phase de « stockage » (la croissance des végétaux).

Ainsi, la gestion des herbiers est envisagée comme une solution naturelle pour soutenir le niveau de la Touvre, mais elle est compliquée par la variabilité des conditions naturelles et le besoin de mieux comprendre les mécanismes de croissance et de répartition de ces végétaux.

La restauration hydromorphologique :

La haute vallée de la Touvre possède une largeur mouillée exceptionnellement large, surtout en comparaison avec la Charente, pour un débit d'environ 13 m³/s. Cette section se caractérise par un fond alluvionnaire plat sans terrasses ni lit incisé, ce qui en fait un cadre optimal pour les objectifs de gestion hydraulique visés pour cette étude. Ce profil pourrait être d'origine naturelle, soulevant des questions scientifiques sur l'évolution hydromorphologique de cette région et le renouvellement de ses sédiments.

Des travaux sur l'hydromorphologie de la rivière sur cette section ne semblent donc pas fournir d'avantages particuliers en termes de pilotabilité et de gestion des hauteurs d'eaux, tout en artificialisant fortement le site et en étant peu réversibles.

2.2.4. Incertitudes et études complémentaires

Le gain (en termes de hauteur d'eau, et plus encore en termes de volume déphasé) amené par ces solutions ne peut pas être quantifié à ce stade.

En ce qui concerne la solution de gestion des herbiers, les éléments complémentaires permettant d'affiner la conception pour consolider un avant-projet sont :

- Observations naturalistes régulières : Des études de terrain permettraient d'améliorer la compréhension de la dynamique de croissance des herbiers, en tenant compte des aléas naturels comme la qualité de l'eau, la concurrence inter-espèces, et les effets climatiques. La réalisation de photographies aériennes précises pourrait fournir une cartographie précise des herbiers et de leur couverture, permettant une analyse plus fine de leur répartition spatiale et de leur impact hydraulique.
- Modélisation hydraulique : il serait possible de modéliser l'impact des herbiers sur les niveaux d'eau. Ceci nécessiterait des données précises sur la bathymétrie et la répartition de la végétation.

Tableau 10 : Avantages et inconvénients de la solution de gestion des herbiers et des solutions type hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	<p>Restauration des herbiers : Cette solution s'analyse en termes d'impact sur le <u>niveau</u> de la rivière. La fonction de transformation hauteur rivière / volume déstocké dans le karst n'est pas une donnée connue. L'évaluation précise de l'impact de cette solution sur les niveaux n'est pas possible en l'absence de données topographiques et bathymétriques fines de la rivière. Le juge de paix sera au final une expérimentation. L'ordre de grandeur est celui du décimètre, ce qui est peu.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Les gains sont jugés nuls.</p>	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	<p>Restauration des herbiers : Solution facile à mettre en place dans le cadre d'une expérimentation ou d'une gestion prolongée.</p>	<p>Restauration des herbiers : La maîtrise d'œuvre (à qui et quand le fauchage doit être effectué) reste à discuter.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Artificialisation forte du lit.</p>
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	<p>Restauration des herbiers : Déphasage dans le temps de la vidange du karst vers la fin de l'étiage.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Déphasage dans le temps de la vidange du karst vers la fin de l'étiage</p>	<p>Restauration des herbiers : L'action de vidange (= le fauchage) est facilement pilotable, mais le pilotage contrôlé du développement des herbiers reste difficile à envisager car aujourd'hui ce développement est très mal compris.</p>
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...)	<p>Restauration des herbiers : Solution complètement réversible</p>	<p>Restauration des herbiers : Pilotabilité de la solution à imaginer.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Solution <u>non réversible et non pilotable</u></p>
Coût	<p>Restauration des herbiers : Coût non quantifiable mais jugés peu important</p>	<p>Restauration des herbiers : La maîtrise d'œuvre restant à discuter, la charge des coûts également.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Solution jugée couteuse à la vue de la quantité de matériaux nécessaire pour une rehausse du fond du lit entre les sources et les premiers seuils.</p>
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	<p>Restauration des herbiers : Aucun impact prévu</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Aucun impact prévu</p>	Sans objet
Impacts sur les autres usages	<p>Restauration des herbiers : Aucun impact prévu</p>	Sans objet
Impacts géotechniques	<p>Restauration des herbiers : Aucun impact prévu</p>	<p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Artificialisation de la Touvre et bilans carbone important à prévoir pour la réalisation des travaux.</p>
Impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	<p>Restauration des herbiers : Augmentation de la hauteur du fil d'eau de la Touvre. Aucun impact sur les rivières Bandiat et Tardoire.</p> <p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Augmentation de la hauteur du fil d'eau de la Touvre. Aucun impact sur les rivières Bandiat et Tardoire.</p>	<p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Artificialisation de la Touvre.</p>
Impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	<p>Restauration des herbiers : Pas d'impact notable sur la faune et la flore, ni sur le paysage et le patrimoine</p>	<p>Hydromorphologie et systèmes fondés sur la nature : Impact fort du fait de l'artificialisation du site.</p>
Contraintes réglementaires	Aspect non étudié spécifiquement dans le cadre de cette étude. La gestion des herbiers ne semble pas sujet à une réglementation particulière.	

2.3. Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences

2.3.1. Principe et historique de la solution

Dès les années 1990 et à l'issue de 5 années consécutives d'étiage très sévères (1989-1994), l'idée de mettre en place un système de rétention de l'eau du karst de La Rochefoucauld au moyen d'une diguette amovible est apparue dans les débats charentais. Le principe était donc de stocker l'eau dans le milieu souterrain en période de hautes eaux et de la restituer durant la période estivale déficitaire.

Pour se faire, le niveau des résurgences du Dormant et Bouillant d'une part, et le niveau de la Font de Lussac d'autre part, étaient rehaussés à l'aide de « diguettes » barrant le flux. L'étude de faisabilité portée par Hydro Invest prévoyait (voir figure 12) :

- Une digue principale de 90 m de long barrant l'ensemble Bouillant – Dormant ;
- Une digue secondaire de 28 m de long barrant Font de Lussac.

La rehausse moyenne du niveau, occasionnée par chaque digue est de 0,5 m, prenant en compte une marge de sécurité de 0,15 m sur la hauteur de débordement en crue.

La hauteur admissible des diguettes a été définie sur la base d'un levé topographique réalisé en 1995, en prenant en compte une hauteur de lame d'eau déversée en période de crue exceptionnelle (débit maximum de 40 m³/s).

Afin de tenir compte des contraintes topographiques (hauteurs des berges), les deux digues présenteraient une cote maximale du fil d'eau différentes avec :

- Fil d'eau du déversoir au Bouillant/Dormant : + 47.03 m NGF
- Fil d'eau du déversoir à Font de Lussac : + 47.56 m NGF

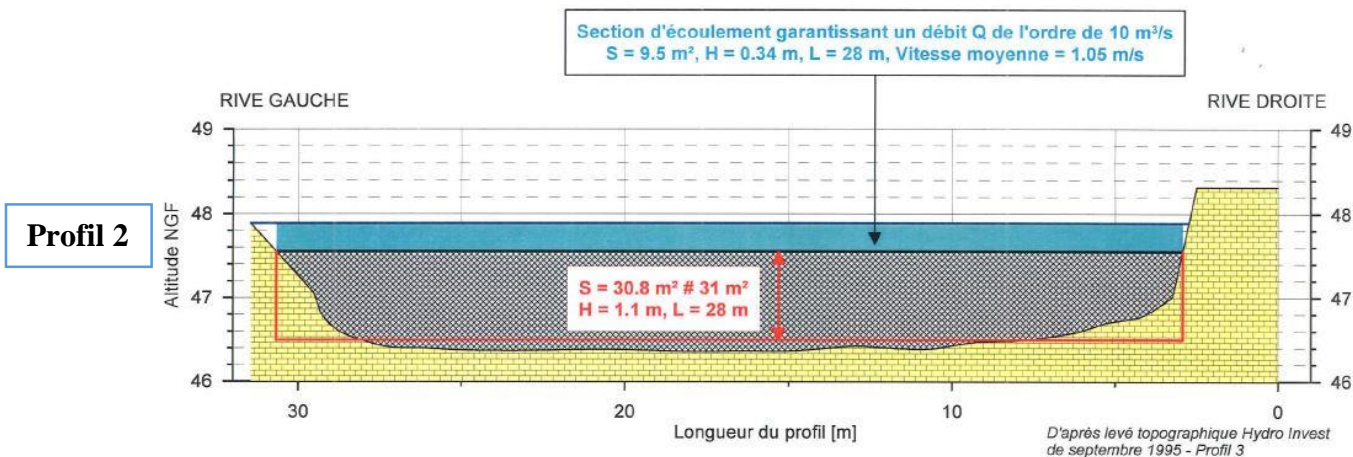
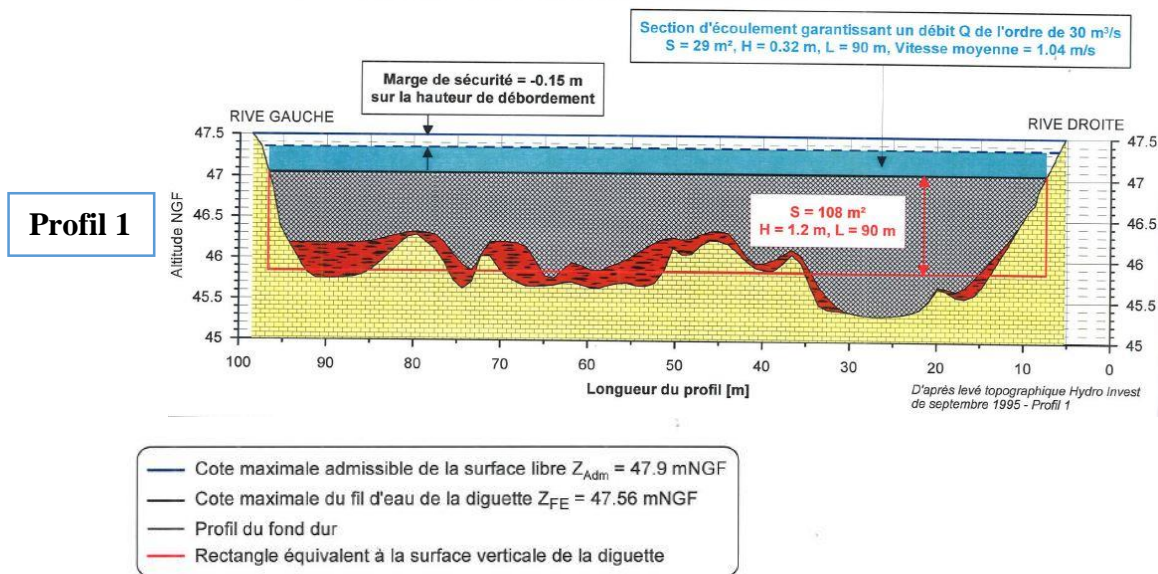
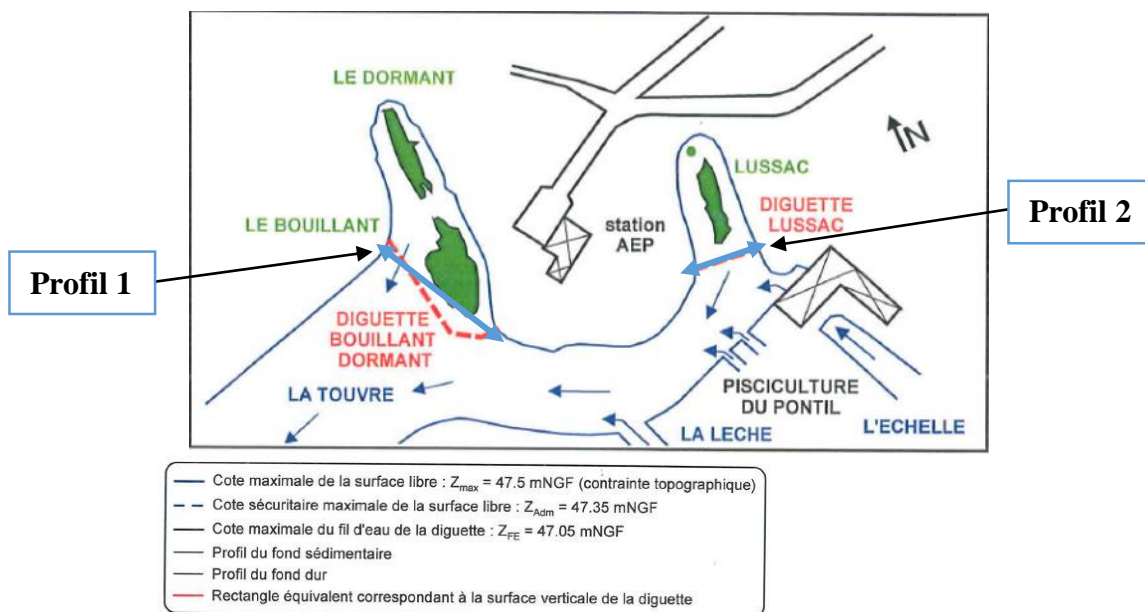
Le volume potentiellement stockable dans le système a été évalué par Hydro Invest entre 4,7 et 7 Mm³, soit 1 à 2 % du volume moyen interannuel (estimé à 400 Mm³). Le calcul s'est basé sur l'hypothèse d'une variation homogène du niveau piézométrique du karst de + 0,5 m induisant le remplissage d'un volume karstique donné. Ce volume correspond au produit de la porosité du milieu (assimilable au coefficient d'emménagement) par la surface influencée de l'aquifère.

Les hypothèses liées à ce calcul sont les suivantes :

- Surface influencée par la rehausse du niveau, estimée à 470 km² (soit l'ensemble de la superficie du Grand Karst hors bassin versant de la Bonnieure) ;
- Coefficient d'emménagement : 2 à 3 %

Hydro Invest mentionne les fortes incertitudes qui pèsent sur ces 2 paramètres compte tenu de l'hétérogénéité du milieu et de la non- connaissance précise du périmètre d'influence. De plus, la constitution de ce stock supplémentaire va dépendre également des conditions hydrologiques pendant les périodes de recharge hivernale.

Figure 12 : Implantation des diguettes (Hydro Invest 2009)



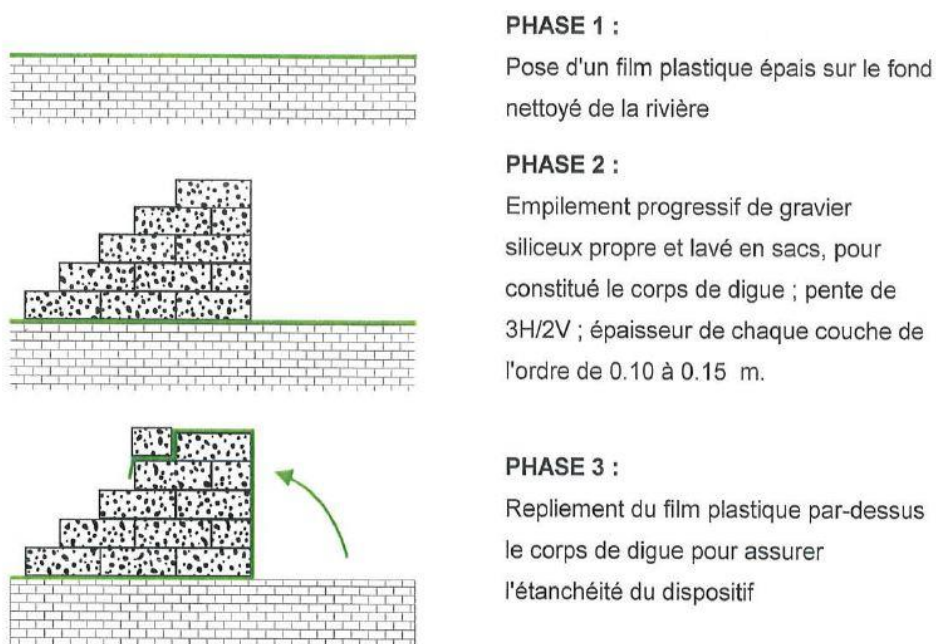
Hydro Invest proposait la mise en œuvre progressive de diguettes par empilement de sacs de graviers siliceux, posés sur un film plastique épais. Cette solution « rustique » et peu coûteuse (200 000 euros en 2009 soit 260 000 euros en 2024) permet de moduler facilement la hauteur des remblais et de s'adapter facilement à la topographie des lieux.

Hydro Invest propose un protocole d'expérimentation avec :

- Mise en place d'un réseau d'instrumentation (suivi piézométrique et hydrométrique, suivi qualité) ;
- Mise en place progressive du dispositif en octobre/novembre ;
- Surveillance lors de la recharge (habituellement au début de l'hiver) ;
- Définition d'un protocole d'ouverture en fonction des courbes de vidange ;
- Surveillance et adaptation de l'ouverture en fonction des conditions hydrauliques de tarissement.
- Démontage très rapide des installations afin de créer une impulsion dans le réservoir.

Hydro Invest considère que ce procédé induit des incidences très faibles sur l'ensemble des usages. La mise en place du dispositif devrait induire une baisse du débit des sources pendant une phase transitoire, pendant laquelle s'effectue un rééquilibrage des potentiels hydrauliques dans le karst. Le comportement du karst pendant cette phase (durée, comportement des niveaux piézométriques) n'est pas prévisible. Cette phase sera suivie d'un état d'équilibre sur l'ensemble du bassin.

Figure 13 : Implantation des diguettes (Hydro Invest 2009)



2.3.2. Proposition de solutions techniques (voir Annexe V)

La pose de diguettes sur les sites du Bouillant / Dormant et de la Font de Lussac a été étudiée, moyennant des solutions réversibles. Cette contrainte forte implique la mise en œuvre d'un pilote dans le Périmètre de Protection Immédiat (PPI) des sources captées.

L'analyse de faisabilité technique ([voir Annexe V](#)) aboutit aux éléments suivants :

- Il existe deux solutions de seuil amovible réalistes, faisables à un coût compris entre 900 et 1100€ par mètre de linéaire : une solution de type seuil poids (inspirée de la proposition d'HydroInvest) et une solution de type barrière souple amovible ;
- Le coût de démontage est sensiblement plus cher pour une solution de type seuil poids ;
- La solution la moins impactante sur l'environnement, la plus adaptative et rapide à déployer / replier consiste à poser une barrière souple amovible de type WaterGate © ;
- Il est possible de concevoir et mettre en œuvre des modules aménageant la chute pour rétablir la continuité sédimentaire notamment, cependant une solution de conduit en fond de lit d'étiage offre une solution plus complète et moins coûteuse si elle est associée au débit réservé ;
- Le pilotage du niveau du plan d'eau par les débits requiert la pose d'un module portant une vanne automatique (soit mécanique type vanne AMIL©, soit commandée). Cet apport permet une gestion plus fine des flux sortant et du volume stocké dans le massif ;
- Enfin, il pourra être pertinent de piloter les débits dans une gamme de régime d'étiage à moyennes eaux pour optimiser la satisfaction des usages et la mobilisation du stock créé dans le massif.

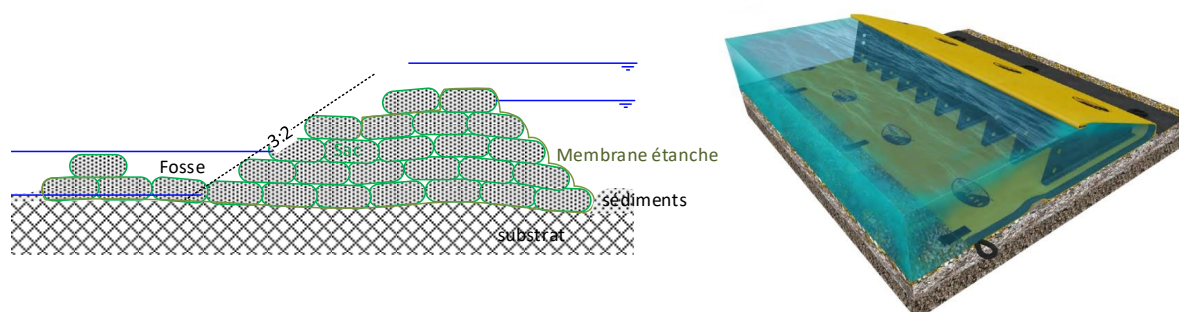


Figure 14 : Coupe transversale du seuil en mur poids (à gauche) et illustration et d'une barrière amovible (à droite, WaterGate© - MegaSecure)

2.3.3. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

2.3.4. Incertitude et études complémentaires

Le gain amené par cette solution ne peut pas être évalué à ce stade.

L'impact le plus important étant la visibilité du dispositif depuis les berges.

Les éléments complémentaires permettant d'affiner la conception pour consolider un avant-projet sont :

- Topographie sur l'implantation des seuils et au-delà visant à préciser la profondeur des alluvions et l'horizon du substrat.
- Pose et suivi de jalons pour mesurer l'épaisseur de sédiments.
- Campagne géotechnique permettant de définir les qualités géotechniques des substrats des sites 1 et 2.
- Essai JET sur les substrats afin d'appréhender l'érosion en pied de chute de seuil.
- Inventaire faune flore et impact environnemental de la rehausse du niveau.

Tableau 11 : Avantages et inconvénients du projet de diguette

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	A ce stade et sans expérimentation préalable, il est impossible de calculer précisément le volume potentiellement stockable (et déstockable) dans l'aquifère karstique. Compte tenu des incertitudes liées à l'hétérogénéité du karst (volume de vide mobilisable en amont) et à sa complexité (existence de pertes de charge et de plusieurs émergences, zone d'influence non connue), le calcul théorique n'est pas concevable scientifiquement. De plus, les données actuelles sur les émergences (essais par pompage, suivi du niveau...) ne permettent pas de conclure précisément à l'influence d'un rabattement (à l'inverse d'une rehausse) sur le niveau de la zone noyée du karst.	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences), artificialisation	Solution réversible et démontable en urgence. Pas de génie civil. Solution modulable permettant une rehausse progressive du niveau. Mise en œuvre rapide sur les émergences, sans impact sanitaire sur le captage. Respect des prescriptions dans le PPI.	Le mode d'intervention limitera l'utilisation d'engins en bordure des sources et sera proscrite dans le lit. Les matériaux de construction du seuil doivent être manœuvrables à la force humaine. La solution réversible implique une insertion paysagère limitée.
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	L'avantage d'un tel dispositif résulte dans la rehausse du niveau de la zone noyée du karst en amont. Le débit de surverse de l'ensemble sourcier est fonction de la charge piézométrique du karst, de la section des 3 exutoires et de l'altitude du seuil de débordement. Se rajoute à cela l'existence d'une loi de variation des pertes de charge, qui conditionne la répartition des écoulements entre les trois émergences et notamment entre l'ensemble Bouillant/Dormant et Font de Lussac. En modifiant les conditions topographiques d'émergence (au même titre qu'un comblement du lit mineur en aval), la rehausse du niveau par des diguettes en aval ne devrait engendrer qu'une rehausse du niveau piézométrique sans en modifier le débit des sources. En effet, seule une modification des pertes de charge dans le conduit (réduction de la section, comblement) aura un effet immédiat sur le débit de l'ensemble sourcier.	Aucune quantification possible de la rehausse du niveau piézométrique en amont et du périmètre d'influence. Seule une expérimentation plus poussée (pompage avec rabattement induit dans la vasque) permettrait de quantifier précisément cet impact. Le projet engendrera des pertes de charge très limitées du système karstique, contrairement à une solution de réduction des conduits karstiques. Si la rehausse se fait dans les limites des variations naturelles du système, l'activation de trop-plein ne devrait pas apparaître. A noter qu'une instrumentation de Font de Lussac, couplée à une topographie plus fine de l'ensemble sourcier permettrait de comprendre plus précisément la loi de pertes de charges entre les sources.
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...)	Solution réversible pour les 2 alternatives, et démontable en urgence concernant la solution de type Water Gate. Le pilotage du niveau du plan d'eau pourra se faire par la pose d'un module portant une vanne automatique (mécanique ou commandée). Il permettra une gestion plus fine des flux sortant et du volume stocké dans le massif (avec l'aide du dispositif d'instrumentation).	La stabilité de l'ouvrage devra être garantie pendant les crues de la Touvre et ce jusqu'à plus de 30m ³ /s
Coût	Le montant d'un dispositif de type Water Gate est estimé entre 900 et 1100€/ml en considérant l'achat des barrières (l'alternative à la location n'est pas rentable sur une durée de pilote sur plusieurs années). Soit pour deux dispositifs d'un total de 120 ml, une enveloppe budgétaire de 150 000€. Ce coût n'intègre pas les études complémentaires, la maîtrise d'œuvre (10%) et les options.	Prévoir une enveloppe en cas d'aléas (surveillance en cas de crue, interventions d'urgence...)
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Le dispositif proposé engendrera un impact très limité sur le captage d'eau. L'impact quantitatif est nul (le dispositif ne va pas modifier le régime d'écoulement des sources). L'impact qualitatif se limitera à la gestion de la sédimentation et de la végétation en amont des seuils.	La sédimentation (organique ou minérale) devra être surveillée en amont de chaque ouvrage, avec une gestion régulière si nécessaire.
Impacts sur les autres usages	Aucun impact n'est à prévoir sur les usages en aval.	RAS
Impacts géotechniques	Limité car pas de fondations. Si la rehausse du niveau des émergences se fait dans la plage des variations naturelles, aucun impact géotechnique (effondrements, débouillage) n'est à prévoir	Ancrage à prévoir dans le substratum afin de garantir la stabilité du dispositif en cas de forte crue Visite technique approfondie et régulière des sources à prévoir après chaque crue. La rehausse durable de la nappe d'accompagnement pourra modifier des gradients hydrauliques locaux.
impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	Aucun impact sur le débit en aval (le débit du ruisseau de la Touvre reste inchangé). Un dispositif de transparence sédimentaire peut être envisagé. Aucun impact sur les ruisseaux amont	RAS
impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	Aucun impact sur la faune et la flore car le débit est maintenu. Les seuils devraient engendrer une augmentation des vitesses en aval Un franchissement piscicole peut être maintenu si nécessaire (à voir avec les services de l'Etat).	Le dispositif sera fortement visible depuis les berges et donc impactant le paysage. Les bâches peuvent être commandées avec des coloris plus intégrés (vert) au paysage. La rehausse durable du niveau d'eau et de la nappe d'accompagnement modifiera la relation de la ripisylve avec la nappe, ainsi que la hauteur d'eau dans la vasque. Cela pourrait entraîner une migration des espèces pionnières dans la zone de marnage et une mortalité de certains individus ainsi qu'un changement de milieu dans la vasque.
Contraintes réglementaires	Le projet (travaux et expérimentation) doit faire l'objet d'une concertation avec les services de l'Etat. Le dispositif ne devrait pas modifier le profil en long et en travers du lit du ruisseau de la Touvre ; La rehausse du niveau d'eau engendré par le seuil ne devrait pas dépasser 1 m entre l'amont et l'aval.	

2.4. Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant

2.4.1. Principes et historique de la solution étudiée (voir Annexe IV)

Cette solution propose de ralentir la vidange du karst en travaillant sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse d'un seuil existant au niveau du seuil de la Tracherie.



Figure 15 : Photographie aérienne du seuil de la Tracherie (photographie Eaucéa)

Cette solution est présentée en miroir de la solution technique précédente : il s'agit du même mécanisme physique recherché (hausse et contrôle du niveau d'eau de la Touvre) mais en s'appuyant sur un ouvrage existant, localisé en aval des sources.

L'objectif recherché est alors de palier certaines problématiques de la solution précédente, notamment en ce qui concerne son impact paysager (l'artificialisation des sources). Elle se fait aux dépens :

- De l'efficacité de la solution, puisque pour obtenir un effet notable sur les sources, le niveau d'eau à la Tracherie doit être significativement augmenté.
- Des aménagements nécessaires au fonctionnement des piscicultures en aval, dont une reconstruction devra être prévue.

[Une analyse détaillée de cette solution est présentée dans le cadre de l'Annexe IV : Piloter la vidange par l'aval.](#)

2.4.2. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

2.4.3. Synthèse de la solution

En positionnant un seuil à environ 500m des résurgences, l'objectif est de créer un effet de rehaussement en amont, augmentant ainsi le niveau d'eau aux sources. Cette surélévation serait ajustable, intégrant des dispositifs de régulation pour contrôler précisément le débit et adapter le niveau d'eau aux variations saisonnières et aux conditions de crue.

Les avantages incluent la possibilité de réguler le niveau d'eau de manière modulable, permettant ainsi une vidange contrôlée d'un certain volume du karst, mais la solution présente des défis techniques. Ces derniers incluent la nécessité d'une fondation solide pour le seuil, la gestion de la sédimentation en amont, et des impacts importants sur les piscicultures locales.

Le coût de l'opération semble être important, et la réversibilité nulle.

2.4.4. Incertitudes et études complémentaires

En l'absence de données bathymétriques et topographiques fiables, et comme pour la solution précédente, il n'est à ce stade pas possible de convertir la hausse de niveau potentielle au niveau du seuil en hausse de niveau au niveau des sources, et encore moins en volume stocké puis déphasé.

Tableau 12 : Avantages et inconvénients sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	Cette solution relève du même principe que la solution de surélévation à l'aval immédiat des sources, seule la position du seuil diffère. A ce titre, la réponse est identique, avec une incertitude augmentée puisque la pente hydraulique entre le seuil (plus en aval) et les sources doit être prise en compte : « A ce stade et sans expérimentation préalable, il est impossible de calculer précisément le volume potentiellement stockable (et déstockable) dans l'aquifère karstique. Compte tenu des incertitudes liées à l'hétérogénéité du karst (volume de vide mobilisable en amont) et à sa complexité (existence de pertes de charge et de plusieurs émergences, zone d'influence non connue), le calcul théorique n'est pas concevable scientifiquement. De plus, les données actuelles sur les émergences (essais par pompage, suivi du niveau...) ne permettent pas de conclure précisément à l'influence d'un rabattement (à l'inverse d'une rehausse) sur le niveau de la zone noyée du karst. »	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	Par rapport à la solution précédente, la localisation du seuil en aval des résurgences est un avantage : <ul style="list-style-type: none"> - Positionner le seuil de surélévation plus loin des résurgences pourrait minimiser les impacts directs sur les sources elles-mêmes. - La présence d'un seuil à la Tracherie offre une base structurelle sur laquelle des travaux de surélévation et d'ajustement peuvent être envisagés. Cela pourrait faciliter les interventions par rapport à une création ex nihilo, et simplifier les problématiques d'insertion de l'ouvrage dans le paysage 	Deux points sont notables : Une complexité de la régulation : La régulation du niveau d'eau via un dispositif pilotable serait nécessaire pour s'adapter aux fluctuations de débit. Cependant, cela impliquerait des travaux lourds, tels que la reconstruction du seuil et l'intégration de systèmes de gestion de niveau, entraînant des problématiques de gouvernance et de gestion technique. Des impacts sur les piscicultures : Le muret de séparation du bief d'amenée d'eau des piscicultures n'est que légèrement plus élevé que le niveau d'eau (environ 20 cm). Il sera donc nécessaire d'imaginer un dispositif de restitution spécifique, coûteux et perturbant le fonctionnement des piscicultures à minima pendant la durée des travaux.
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	Idem à la solution précédente « 2.3 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences »	Idem à la solution précédente « 2.3 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences »
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »)	Aspect modulable : La possibilité d'intégrer des dispositifs de régulation (comme des vannes ajustables) offre un contrôle précis du débit retenu ou lâché, permettant de s'adapter aux variations saisonnières et d'étiage, et d'optimiser le niveau d'eau pour les besoins écologiques et agricoles. Retrait d'urgence : Si un système de régulation est bien conçu, il peut être ajusté rapidement en cas de crue ou de besoin d'abaisser le niveau d'eau. Cela permet une réactivité en situation d'urgence, limitant les risques pour les infrastructures et les écosystèmes en aval.	Un tel ouvrage serait complexe à réaliser. Il perturberait lourdement le fonctionnement des piscicultures pendant la phase des travaux (construction de batardeaux, dérivation temporaires, turbidité) et peut être considéré comme <u>irréversible</u> .
Coût		Des estimations sommaires fondées sur une largeur de 100 m environ pour une hauteur au-dessus du sol d'environ 2 m aboutissent à des coûts d'investissement estimés autour de 400 000 à 500 000 euros hors études et dispositif de compensation environnementale.
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Idem à la solution précédente « 2.3 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences »	Idem à la solution précédente « 2.3 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources par la mise en place d'une ou plusieurs diguettes à l'aval immédiat des résurgences »
Impacts sur les autres usages	Sans objet	Impact fort sur le fonctionnement des piscicultures.
Impacts géotechniques	Sans objet	La mise en place d'un seuil surélevé nécessite une fondation robuste, ancrée sur un radier bien conçu pour résister aux variations de débit. La structure doit être suffisamment résistante pour éviter les ruptures ou les affaissements qui pourraient compromettre la gestion du niveau d'eau. Le rehaussement pourrait entraîner une accumulation sédimentaire en amont, rendant le lit plus profond et augmentant la charge sédimentaire, avec un risque de colmatage. Dans cette configuration, le risque d'un exhaussement durable du fond est élevé, car l'évacuation des sédiments serait difficile à réaliser dans une zone large sans dispositif de chasse hydraulique.
Impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	Pas d'impacts notables	Sans objet
Impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	Impact paysager plus faible que la solution en amont des sources, puisqu'elle intervient sur un ouvrage déjà existant / secteur déjà artificialisé	Sans objet
Contraintes réglementaires	Le projet (travaux et expérimentation) doit faire l'objet d'une concertation avec les services de l'Etat.	

2.5. Solution fondée sur l'obstruction des conduits karstiques par la mise en place d'un dispositif permettant de réduire la section d'écoulement à l'amont immédiat des résurgences

2.5.1. Solutions proposées en 2023

Les observations hydro-spéléologiques effectuées et/ou recensées par M. SEGUIN (photoreportage et témoignages) ont montré l'existence d'au moins 2 effondrements au niveau du siphon du Bouillant, à la profondeur de -15m (par rapport au terrain naturel). M. SEGUIN attribue ces effondrements à une origine anthropique. Les effets de ces événements sur la topographie du siphon sont schématisés en page suivante.

L'un des premiers effondrements serait survenu entre 1975 et 1986 (date non définie). Il est caractérisé par un éboulement très important du plafond de la galerie à -17m de profondeur (voir figure 15). Le second événement, en date du 19/08/2005 à 23h45, a pour caractéristiques l'effondrement d'un gros bloc coincé dans un passage étroit (Bloc Gb, Figure 17).

M. SEGUIN mentionne également des opérations de déblaiement ou de désobstruction réalisées sur le griffon de la Font de Lussac en 2018.

Pour M. SEGUIN, les conséquences des effondrements sur le Bouillant sont :

- L'augmentation de la section du siphon (de 1,42 m² à 3,33 m²) ;
- La diminution des pertes de charge et une augmentation du débit du Bouillant (x 2,3) ;
- La capture du débit de la source de Font de Lussac (et donc la diminution de son débit notamment étiage) ;
- L'augmentation des vitesses à la sortie de l'émergence (lessivage des sédiments et des herbiers).

Pour lui, la vidange du système karstique par des siphons de très faibles dimensions favorisait la rétention des volumes hivernaux et une meilleure régulation des étiages. L'agrandissement des différentes sections a conduit à des cycles de vidange plus rapides et des étiages plus longs et plus sévères.



M. SEGUIN propose un projet d'obturation partielle de certains passages étroits des siphons, dans le but de rétablir les sections d'origine et de ralentir la vidange du système. Le principe est de revenir aux conditions antérieures à 1975, avant les effondrements.

Il propose plusieurs étapes :

1. Obturation de 4 griffons de surface existants autour des sorties principales de Font de Lussac. Ces griffons ont, semble-t-il, été déblayés en 2018. L'obturation se ferait par comblement de petits cailloux.
2. Obturation partielle de l'étranglement du siphon du Bouillant à -17 m de profondeur, par dépôt d'un gros bloc de plusieurs tonnes.
3. Aménagement du lit de la rivière Touvre par remblaiement local (sur quelques mètres de longueur), des surcreusements actuels avec des cailloux de calcaire marneux, afin de relever et uniformiser localement le fond du lit rivière.
4. Obturation par des blocs ou des obturateurs de certaines étroitures dans le siphon de Font de Lussac, situés vers 6 et 7 m de profondeur.

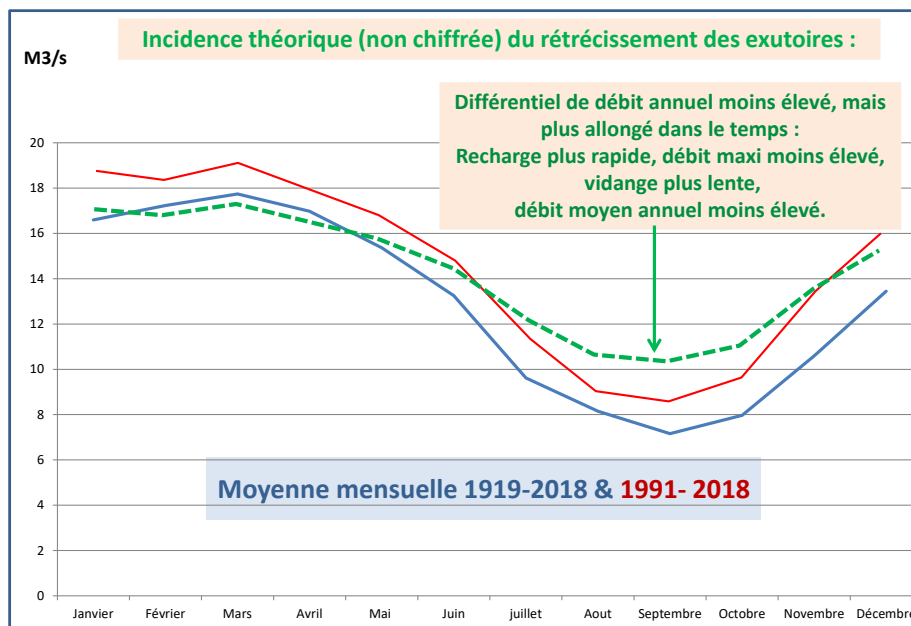


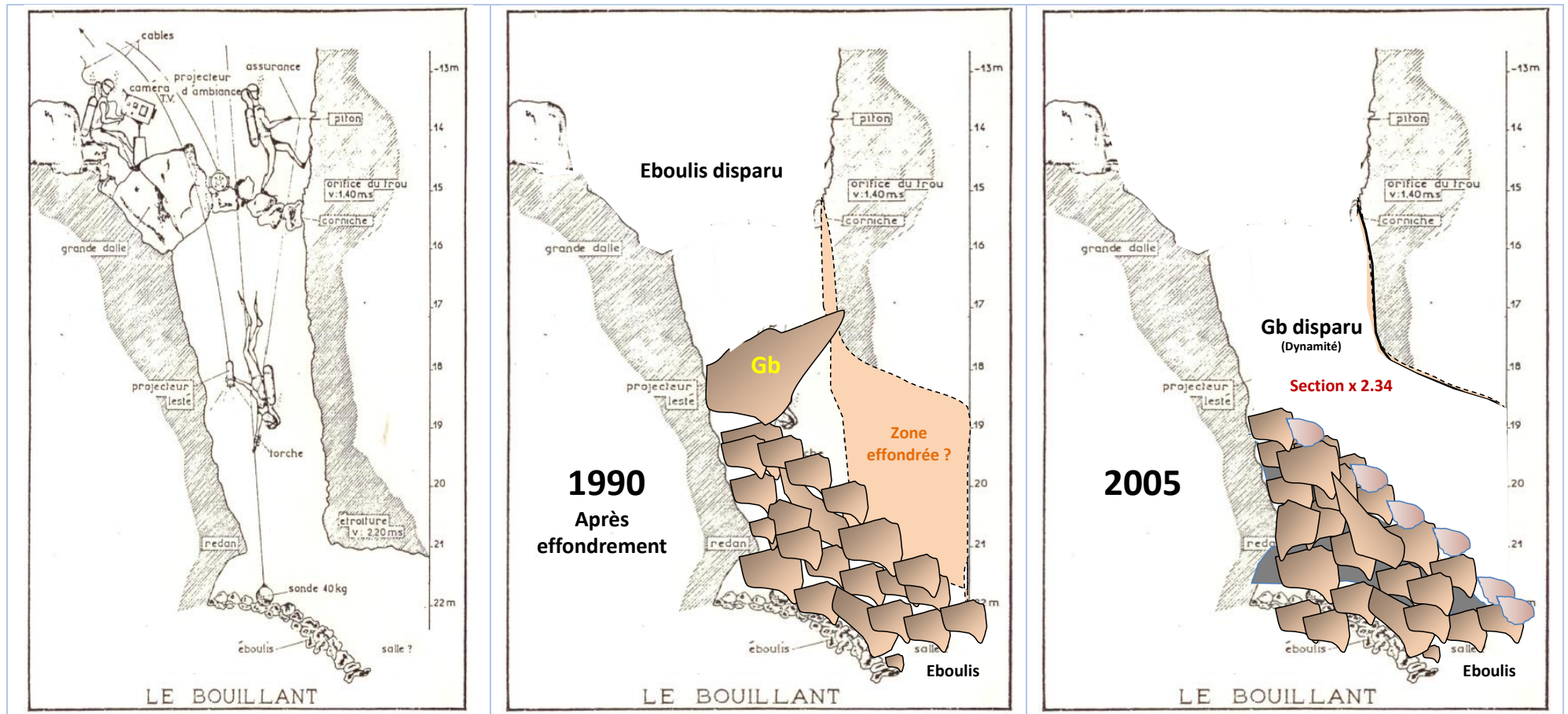
Figure 17 : Incidence théorique des travaux mentionnés par M. SEGUIN sur le débit moyen mensuel de la Touvre

2.5.2. Analyse de la solution (voir Annexe VI)

L'analyse de la réduction de la section des conduits karstiques est présentée en Annexe VI.

La solution technique reste envisageable à l'aide de solutions réversibles et à expérimenter. L'étude montre que cette solution est plus efficace que la pose d'un seuil en aval car elle permet une meilleure régulation de la vidange du karst par augmentation des pertes de charges dans les conduits karstiques et par une diminution du débit des sources. De ce fait, cette solution ne peut s'envisager que si un dispositif est mis en place aussi bien à la source de Font de Lussac qu'au Bouillant.

Figure 18 : Schéma de visualisation des effondrements depuis 1975 (source M. SEGUIN)



L'analyse de faisabilité aboutit aux éléments suivants :

- Deux solutions d'obturation partielle, modulables et réversibles, se dégagent de cette étude et pourraient être testées : l'une dite simple par installation progressive d'éléments type poutrelles, l'autre plus complexe à l'aide de ballons obturateurs gonflables et modulables à distance.
- La faisabilité technique de ces solutions nécessite une meilleure connaissance/reconnaissance topographique des émergences et de la loi régissant la répartition des débits entre les deux émergences.
- Les conditions de plongées sont difficiles et nécessitent des spéléologues plongeurs chevronnés et habilités. Les travaux ne peuvent se faire qu'en étiage très prononcé et lorsque les eaux des deux émergences sont claires (sans turbidité).

2.5.3. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

Le gain amené par cette solution ne peut pas être évalué à ce stade et ne pourra être évalué qu'à partir d'une expérimentation validée en amont par un protocole précis.

Cette solution reste la plus risquée puisqu'elle consiste à intervenir directement sur les conduits karstiques, en équilibre dynamique les uns avec les autres. On ne maîtrise donc pas toutes les conséquences du déséquilibre hydraulique qui pourrait être produit par une intervention sur les conduits, même le but est de rétablir les sections d'origine.

Le test devra donc se faire dans un premier temps, dans la plage des variations naturelles du système.

2.5.4. Incertitudes et études complémentaires

Afin de mieux comprendre les variations de charges entre les deux sources et de quantifier les impacts potentiels, nous recommandons une instrumentation de l'ensemble sourcier sur un cycle hydrologique. Cette phase permettra également de cartographier précisément le site par des relevés topographiques précis ainsi que les émergences noyées. En effet, à ce stade, aucun document topographique récent et précis ne permet d'établir un état des lieux des sections où la solution de réduction pourrait être envisagée.

Cette phase préalable comprendra :

- **L'instrumentation de la source Font de Lussac** à travers l'installation d'une station hydrologique sur l'émergence.
- **L'instrumentation par des capteurs de pression installés au fond des émergences** par des plongeurs spécialisés. Ces capteurs permettront de mesurer les variations de charges hydrauliques (différentiels de pression) lors de conditions hydrologiques différentes et de confirmer les différences de pertes de charges.
- Lors de la pose des capteurs, **une reconnaissance subaquatique** accompagné d'un **relevé topographique** des résurgences devra être effectuée avec établissement de coupes et profils précis (centimétrique) en travers permettant de cerner la morphologie des sections qui pourraient faire l'objet d'un pilote. Ce relevé devra s'accompagner d'un reportage photographique permettant de visualiser correctement les sections concernées.

- **Le relevé topographique et altimétrique de surface** de l'ensemble sourcier avec établissement de cote altimétrique très précise de points de repères ;
- **La faisabilité de compléter le réseau de suivi par un piézomètre proche des émergences** (à 100-150 m) et permettant de quantifier les pertes de charges dans le karst.
- **Le suivi de l'ensemble du monitoring** avec des campagnes de jaugeages mensuels (Font de Lussac, Echelle et Lèche au Pontil, Bouillant-Dormant).
- L'établissement d'un rapport d'interprétation des données et d'un Avant-Projet de travaux.

Tableau 13 : Avantages et inconvénients du projet d'obstruction des conduits

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	<p>Les avantages de cette solution résident dans l'augmentation des pertes de charge directement dans les conduits karstiques. Cette augmentation aura un effet direct en diminuant le débit des émergences et donc en augmentant la charge hydraulique dans le karst en amont. Cette solution a donc pour effet de réguler la vidange du karst.</p> <p>M. SEGUIN estime que l'augmentation de la section des siphons karstiques en 2005 a eu pour effet de multiplier le débit par 2,3. Il estime que la solution de réduction de section aura pour conséquences « d'étaler » la courbe des débits annuels de la Touvre (voir figure 16 dans ce rapport) avec un différentiel de débit annuel moins élevé. Il estime l'augmentation théorique du débit moyen mensuel de la Touvre en étiage comprise entre 2 et 3 m³/s.</p> <p>Selon les experts consultés, ces calculs sont totalement théoriques et attachés à une forte incertitude. Compte tenu de l'hétérogénéité du milieu karstique, le calcul précis du bénéfice sur le débit ne pourra être évalué qu'après une expérimentation avec instrumentation des émergences et du système noyé du karst. De plus, le bénéfice apporté dépend étroitement de la réduction des pertes de charges que l'on va engendrer, paramètre que l'on ne sait pas évaluer à ce stade. Le volume potentiellement stockable et déstockable n'est pas évaluable à ce stade.</p>	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	<p>La solution proposée de mise en œuvre d'éléments démontables et réversibles permet d'intervenir en toute sécurité et sans impact notable sur la morphologie des émergences. En cas de problèmes majeurs après le test, ces éléments peuvent être enlevés rapidement.</p> <p>L'idée est de mettre en place une solution modulable et progressive afin de tester la réponse du karst (en termes de débit et de niveaux) à toutes modifications, même mineures.</p>	<p>La solution nécessite des travaux subaquatiques, dans un périmètre de protection de captage. Des précautions sont à prendre d'un point de vue sanitaire et technique (utilisation de matériaux non dégradables).</p> <p>Les conditions de plongées sont assez difficiles et nécessitent des spéléologues plongeurs chevronnés, habilités en classe 2A et B ;</p> <p>Les travaux ne pourront se faire qu'en conditions d'étiage prononcé et sans turbidité de l'eau.</p> <p>La solution dite simple paraît plus adaptée aux contraintes du karst (facilité d'installation, hétérogénéité et rugosité des conduits...).</p>
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	<p>Comme mentionné précédemment, l'augmentation des pertes de charge va obligatoirement engendrer une modification du niveau des émergences en fonction de la réduction appliquée à l'une ou l'autre des sections.</p> <p>Par exemple, la réduction de la section de passage du Bouillant devrait engendrer une diminution du débit au Bouillant (et donc une diminution du niveau d'émergence) et une augmentation du débit de Font de Lussac. Cette diminution du niveau devrait être de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres.</p> <p>Le périmètre d'influence n'est pas calculable à ce stade.</p>	<p>Le principe d'obturation partiel d'un conduit karstique est sans doute la solution la plus efficace en termes de stockage dans le réservoir karstique. Par contre, elle reste la solution la plus risquée puisqu'on va intervenir directement sur les conduits karstiques, en équilibre dynamique les uns avec les autres. On ne maîtrise donc pas toutes les conséquences du déséquilibre qui pourrait être produit. Le test devra donc se faire dans un premier temps, dans la plage des variations naturelles du système.</p> <p>Les plongeurs spéléologues pensent qu'une telle solution pourrait engendrer des instabilités dans les conduits noyés par augmentation des vitesses de circulation de l'eau.</p>
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...)	<p>Le système sera modulable et réversible rapidement.</p> <p>La mise en place d'éléments type poutrelles ou de gonflages est prévue pour des solutions provisoires en lien avec l'expérimentation.</p> <p>En cas de validation de la faisabilité de cette solution, des solutions pérennes pourraient être proposées notamment le maintien d'éléments définitifs mais démontables dans tous les cas</p>	<p>La solution telle qu'envisagée par M. SEGUIN est une solution dit définitive, permettant de revenir à des conditions naturelles antérieures à 1975.</p> <p>Après expérimentation, une solution modulable par maîtrise de l'ouverture de la section pourrait être envisagée. Elle permettrait de maîtriser les débits lâché en fonction des saisons.</p>
Coût	<p>Le budget est évalué à 150 k€ pour la solution simple et 250 k€ pour la solution complexe (avec achat des obturateurs).</p>	
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	<p>Des mesures d'hygiène et sécurité seront à prévoir lors des travaux et avec accord de l'ARS. Il s'agit de mesures de gestion des pollutions.</p>	<p>Le protocole d'expérimentation devra prendre en compte la répartition des débits entre les deux ensembles sourciers, afin de ne pas perturber l'équilibre actuel.</p> <p>Un programme analytique devra être mis en place sur les sources avec suivi de la turbidité, la conductivité et la température. Cette solution pourrait engendrer temporairement des remises en suspension de fines argileuses, impliquant un épisode de turbidité au captage.</p>
Impacts sur les autres usages	<p>La meilleure régulation des débits devrait avoir un impact positif sur les enjeux et usages en aval.</p>	<p>Il sera important de suivre les paramètres déclassant pour les pisciculteurs (turbidité, azote, oxygène dissous) afin de contrôler leur non-variation au cours des tests.</p>
Impacts géotechniques	<p>Si l'expérimentation reste dans les plages de variation naturelle du système, aucun impact géotechnique ne devrait apparaître.</p>	<p>Il sera important de vérifier à chaque étape, par des campagnes régulières d'observations de terrain, la réactivation de trop-pleins, même s'ils sont proches des sources.</p>
impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)		<p>Cet impact est impossible à quantifier à ce stade des connaissances.</p>
impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	<p>Les travaux se faisant en subaquatiques, aucun impact sur le paysage et le tourisme ne devrait apparaître. Les travaux se feront sur un temps court.</p>	
Contraintes réglementaires	<p>Une réunion de concertation devra être organisée avec les services de l'Etat afin de vérifier la comptabilité de ces travaux avec le Code de l'Environnement et de la Santé.</p> <p>Les travaux n'engendrant aucun impact notable sur le niveau d'eau (probablement quelques dizaines de cm) et aucune modification des sections en long et en travers. Le projet ne serait donc pas soumis à la Loi sur l'eau. Il est possible que la DDT demande cependant un document d'incidences.</p>	

2.6. Solution fondée sur la nature sur le bassin d'alimentation du karst par aménagement des pertes

2.6.1. Principe

L'une des solutions proposées consiste à différer l'infiltration directe des eaux superficielles (du Bandiat et de la Tardoire) en privilégiant une infiltration plus diffuse et différée. Ceci pourrait se faire en créant des aménagements de pertes principales. Cela jouerait un rôle important dans le transfert rapide et quasi instantané des eaux des bassins versants amont, notamment en hautes eaux.

En 2014, l'approche menée pour la définition des périmètres de protection s'est basée sur l'évaluation des zones d'infiltration préférentielle (voir figure 18). Cette étude a établi des **fiches d'identification des phénomènes karstiques majeurs** sur la base de relevés de terrain et des bases de données spéléologiques (CDS16, travaux de Vauvillier et Savin).

Sur cette base, plus d'une centaine de pertes ont été inventoriées, essentiellement situées en rive gauche des deux vallées. On distingue plusieurs typologies :

- Les pertes actives et majeures (voir tableau suivant), distinguées par des orifices importants qui absorbent en totalité et de façon quasi-permanente les écoulements. Elles sont essentiellement concentrées sur le cours du Bandiat. Elles ont pour effet de concentrer fortement les écoulements vers un point unique.
- Les paléo-pertes situées en bordure des vallées. Elles sont souvent alignées en bordure des versants calcaire et ne servent de points d'absorption que lors des débordements exceptionnels des deux rivières.
- Les pertes mineures souvent peu visibles car colmatées et qui participent de façon plus diffuse à l'infiltration des eaux.
- Les effondrements constatés dans le lit majeur des deux cours d'eau. Ils se manifestent souvent après de fortes crues et jalonnent souvent les prairies. Ils sont souvent comblés par les agriculteurs.

Tableau 14 : Synthèse des principales pertes

N° Fiche	Nom	N°inventaire	PPR	Commune	Observations de terrain
16	Perte de la Guirlande	16269-30	B4	PRANZAC	Pertes majeures en bordure du lit majeur du Bandiat ne fonctionnant qu'en crue. Alignée sur une zone d'autres pertes.
24	PERTE DE CHEZ ROBY	16067-16	B4	BUNZAC	Perte importante du Bandiat (trop-plein dérivé). Accès au collecteur en aval des pertes.
26	Perte des Vieilles Vaures	16003-34	B4	SAINT-PROJET-SAINT-CONSTANT	Dernières pertes importantes du Bandiat. Nombreux effondrements à proximité.
37	LES PINONNES	16280-29	B4	RIVIERES	Perte finale du Bandiat
38	Perte de la Caillère	16280-38	B4	RIVIERES	Perte importante du Bandiat
39	Perte de Gauffry	16344-34	B4	SAINT-PROJET-SAINT-CONSTANT	Perte importante du Bandiat
40	PERTE LE GRAND TAILLIS	16280-37	B4	RIVIERES	Perte importante du Bandiat
44	GOUFFRE PUY PARAIT	16379-42	C2	TAPONNAT-FLEURIGNAC	Perte sous la STEP.
45	PERTE BOURG	16406-25	B4	VILHONNEUR	Perte de la Tardoire sous le hameau de Vilhonneur
54	CHEZ LASCoux	16280-62	B4	RIVIERES	Plus important gouffre connu
56	PERTE CHEZ LIOT	16280-61	B4	RIVIERES	Perte importante de la Tardoire
57	GOUFFRE DE LA BERGE	16003-35	B4	AGRIS	Perte importante de la Tardoire
90	PERTE DE TROTTE RENARD	16067-25	B4	BUNZAC	Perte importante du Bandiat
91	PERTE MONTGOMARD	16067-26	B4	BUNZAC	
92	PERTE DE TROTTE RENARD	16067-27	B4	BUNZAC	Perte importante du Bandiat
93	PERTE LA FORGE	16274-6	B4	RANCOGNE	Perte importante
94	PERTE DU GROS ROC	16280-36	B4	RIVIERES	Ensemble de pertes très importantes

Ces éléments cartographiques peuvent être comparés aux résultats des traçages effectués depuis plusieurs années sur le système. Certaines pertes ont en effet montré des temps de parcours très rapides des eaux souterraines (3 à 5 jours pour rejoindre les sources de la Touvre).

Tableau 15 : Synthèse des principaux traçages sur le système de la Touvre

	Tardoire (chez Lascoux)		Tardoire (Montbron)	Tardoire (Ramisse)	Bandiat (Feuillade - perte)	Bandiat (Saint-Projet - perte)	Bandiat (Saint-Projet – fil de l'eau)	Z.A. Braconne
	BE	HE	BE	HE	BE	HE	HE	HE
T ap (jr)	8	4	11	4	7	3	4	20
T mod (jr)	10	6	13	5	10	5	5	93
T pas (jr)	17	18	19	7	18	17	12	125
R (% m)	67	36	22	2	10	42	35	
D (M)	1.5	3.5	163	255	88	42	81	506

Tap : Temps d'apparition en jours
 Tmod : Temps modal en jours
 Tpas : Temps de passage en jours
 R : Taux de restitution en pourcentage de la masse injectée
 D : Facteur de dilution entre la concentration d'injection et la concentration du pic de restitution en millions

2.6.2. Etude de solutions techniques

Le principe consiste à identifier des pertes majeures dans le lit du Bandiat et de la Tardoire, et à caractériser leur rôle dans l'alimentation du système de la Touvre (débit d'infiltration, temps de transfert en basses eaux et hautes eaux vers les sources, rôle dans l'effet transmissif ou capacitif du karst...).

Comme pour la solution de seuil en aval des résurgences, cette solution permettrait de ralentir l'infiltration en hautes eaux afin de la reporter dans des zones d'infiltration plus lentes et plus capacitives (et qui contribueraient au soutien d'étiage de la Touvre).

Le flux d'eau qui « échappe » au système karstique en hautes eaux serait donc dévié, par des systèmes de répartition au niveau des pertes, vers des zones plus capacitives, non identifiées à ce stade de l'étude.

Cette solution nécessite donc une phase amont permettant de remettre à jour les zones d'infiltration préférentielles, d'identifier les pertes majeures qui pourraient faire l'objet d'aménagements (problématique du foncier) et de simuler le rôle d'une répartition des flux autre que celle en place actuellement et de façon naturelle.

Les solutions envisagées seraient de mettre en place des ouvrages de dérivation partielle des flux par des ouvrages de génie civil de type :

- Merlon de ceinturage étanche
- Noue enherbée de contournement
- Busage béton

Ce type d'aménagements a été mis en place dans le cadre du traitement des bétoires en Haute-Normandie (voir Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques –Rapport BRGM/RP-58795-FR). Une bétoire est une sorte de doline, formée par une infiltration préférentielle des eaux de surface vers la nappe phréatique et pouvant créer des désordres en surface.

La faisabilité et le dimensionnement de l'aménagement va dépendre étroitement :

- de la maîtrise du foncier et de l'acceptation sociale du dispositif. L'expérience montre que ces aménagements sont souvent peu acceptés par les riverains et la population locale,
- du contexte morphologique et dimensionnelle de la perte,
- des dysfonctionnements hydrologiques observés à l'échelle du bassin versant,
- de l'efficacité des aménagements sur la gestion du débit.

L'idée est donc de mener une étude de faisabilité à l'échelle des bassins versants de la Tardoire et du Bandiat visant à déterminer les enjeux de chaque perte principale à savoir :

- quel est le fonctionnement actuel de la perte (volumes infiltrés, périodicité, capacité d'engouffrement maximal de la perte, occurrence de fonctionnement, résultats des traçages si existants) et son rôle sur le système de la Touvre ;
- quel est le risque actuel hydrologique (inondabilité, fonctionnement de la rivière...), géotechnique (présence d'infrastructures...) et sanitaire (relation avec la source du Bouillant) ?

Cette étude ne pourra être menée qu'après avoir passé l'étape 1 de la démarche, à savoir la maîtrise du foncier et l'acceptation sociale de la démarche. Une discussion avec le **Syndicat Mixte des bassins Bandiat-Tardoire est également indispensable dans cette démarche**. Le choix de la perte et de l'aménagement se fera ensuite à partir d'une analyse multi-critères incluant le coût, permettant également de cerner l'efficacité du dispositif dans le ralentissement des eaux superficielles.

2.6.3. Avantages et inconvénients de la solution

Les avantages d'une telle solution sont multiples :

- Dévier une partie du flux d'eau s'écoulant en hautes eaux dans les pertes et le réguler vers des zones plus capacitatives permettant de soutenir le débit d'étiage du système karstique.
- Proposer des aménagements simples, qui ne nécessitent en général aucune gestion particulière.
- Disposer de dispositifs modulables qui ont un impact positif sur la rivière en aval et qui améliorent la qualité des eaux en facilitant la circulation des eaux superficielles.

Le retour d'expériences de ce type de solutions montre que l'efficacité de ce type d'aménagement est souvent très difficile à quantifier. L'acceptabilité provient souvent de l'aspect visuel et paysager. A noter que ces aménagements peuvent être soumis à la Loi sur l'eau.

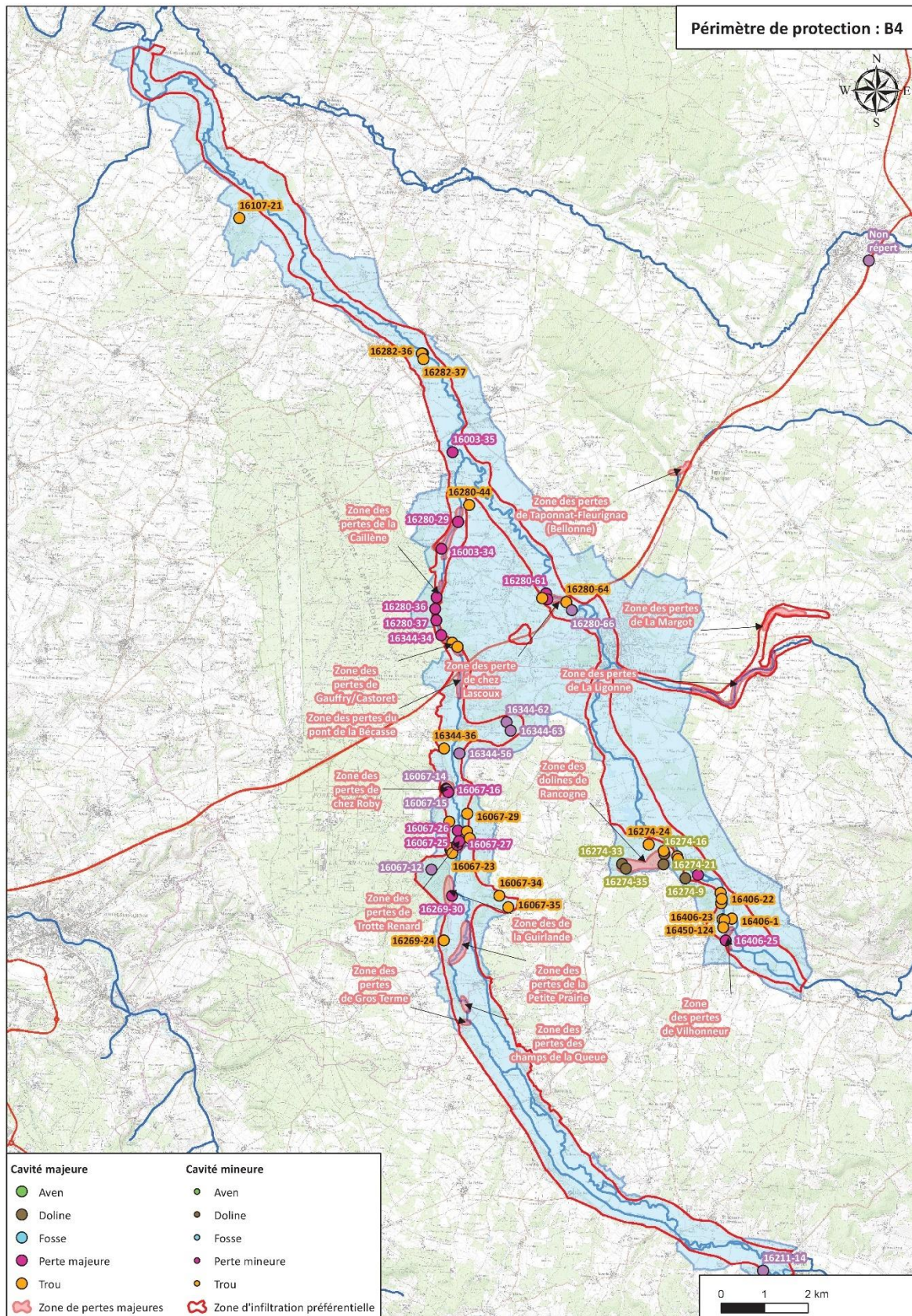


Figure 19 : Carte des zones d'infiltration préférentielle sur le système de la Touvre

Tableau 16 : Avantages et inconvénients du projet d'obstruction des conduits

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	L'avantage d'une telle solution est d'utiliser l'excédent d'eau introduit dans le système karstique via les pertes comme un régulateur des débits d'étiage. Les traçages indiquent que les transferts en hautes eaux via les pertes peuvent être assez rapides (entre 3 et 5 jours) et assez conséquents en volume (probablement entre 30 et 50% du débit de la Touvre). Utiliser une partie de ce débit de hautes eaux pour alimenter des zones à écoulements plus lents et plus capacitives permettraient de diminuer le débit de hautes eaux et de soutenir le débit d'étiage. A ce stade des connaissances, il est impossible de quantifier l'apport de cette solution.	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	Chaque solution doit faire l'objet d'une étude de faisabilité technique qui permet d'adapter l'aménagement de la perte. En général, ces dispositifs sont construits de façon manuelle sans utilisation d'engins dans le lit des ruisseaux.	Il s'agit en général d'aménagements fixes et faisant appel à des techniques de génie civil (type seuil, canal, busage...). Une partie de la perte est donc artificialisée.
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	Ce type de solution doit faire l'objet d'un protocole de gestion en amont permettant de réguler le débit de répartition entre la perte et le ruisseau. Ce protocole permettra, en phase expérimentation, de valider les effets sur le karst. Compte tenu de la temporalité de cette solution (dérivation temporelle en hautes eaux) et des volumes en jeu en hautes eaux, les effets sur le karst devraient être peu importants.	A ce stade des connaissances, on ne sait pas quantifier pas la recharge du système de la Touvre en hautes eaux. Certains scientifiques avancent la réflexion que le système de drainage de la Touvre (via l'alimentation par les pertes) participerait en hautes eaux à la recharge du système karstique, via des alimentations latérales vers les zones capacitives.
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...)	Les retours d'expériences (voir Annexe 1, référence n°37, Trou du Souci, Aveyron) montrent que ces aménagements sont étudiés pour être facilement modulables et permettent une répartition aisée des flux entre la perte et le ruisseau en aval. Cette répartition peut se faire par des systèmes de vannes (manuelles ou automatiques) ou de trop-pleins déversant. Les flux peuvent être facilement contrôlés par des ouvrages de contrôle de type canal Venturi ou autre dispositif.	Il s'agit en général d'aménagements construits en génie civil et non réversibles facilement (mais démontables). On peut néanmoins envisager un mécanisme modulable et piloté en fonction des débits et des situations.
Coût	Le coût est difficile à évaluer à ce stade car il dépend du type d'aménagements que l'on pourrait mettre en place (merlon, seuil) et du foncier à acquérir.	
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Le fait de dévier artificiellement l'eau d'une perte permet très probablement d'améliorer la qualité de l'eau au captage.	Le fait de dévier une partie du flux en hautes d'eau devrait engendrer une diminution du débit des sources pendant cette période (le % de diminution est difficile à estimer à ce stade), qui correspond en général à une période d'excédent d'eau et de besoins en eau potable moins importants.
Impacts sur les autres usages	La Tardoire et le Bandiat ne font l'objet d'aucun usage en aval donc aucun impact n'est attendu.	
Impacts géotechniques	Tout aménagement devra faire l'objet d'une étude de faisabilité visant à démontrer la non-dégradation géotechnique du site des pertes par la mise en place d'aménagement durable.	Il faudra vérifier en amont que les zones pressenties d'infiltration diffuse n'engendrent pas de problèmes plus en aval qu'ils soient d'ordre géotechnique (ouverte de nouvelles pertes, instabilité...), d'ordre hydraulique (débordement, érosion...) ou écologique (destruction de zones humides...). Une étude de faisabilité devra être menée en amont de tout aménagement incluant des relevés morphologiques et des inventaires écologiques.
impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	La dynamique des ruisseaux va être perturbés temporairement et localement en aval des pertes aménagées. Une étude d'impact devra être menée afin de démontrer la non-perturbation hydraulique en aval des aménagements.	
impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine		
Contraintes réglementaires	Ces aménagements sont très probablement soumis au Code de l'Environnement. Un dossier loi sur l'eau devra être déposé en amont pour instruction par les services de l'Etat.	

2.7. Solution fondée sur la réalimentation artificielle de gravière alluvionnaire

2.7.1. Historique

En 2015, la Communauté de Communes La Rochefoucauld Porte du Périgord a porté le réaménagement des carrières de Rancogne et la remise en état de l'ancienne prise d'eau au droit de la Tardoire afin d'alimenter la carrière. Ce site correspond en effet à une ancienne gravière abandonnée en avril 1992, exploitée localement pour l'extraction de granulats. Le projet consistait à recréer un lieu de biodiversité et de promenade des habitants du secteur.



Figure 20 : Panneau d'explication du site de Landaudrie

Le principe a consisté à dévier une partie de l'eau de la Tardoire vers ce plan d'eau, afin d'éviter qu'elle ne se perde dans un gouffre situé dans le lit mineur de la rivière en aval. Le plan d'eau couvre une emprise d'environ 16 ha.

Actuellement, l'alimentation de ce plan d'eau se fait par une prise d'eau sur la Tardoire, manœuvrée manuellement à l'aide d'une vanne. La réalimentation du plan d'eau :

- Se fait en dehors de la période comprise entre le 15 juin et le 30 septembre conformément à l'Arrêté du 27 Août 1999 (Article 6), par dérivation de 2 l/s ;
- Est interdite en dehors des périodes prescrites par l'arrêté préfectoral annuel réglementant la manœuvre des vannes sur les cours d'eau par prise d'eau superficielle.

La Communauté de Communes a évalué un bilan théorique de ce plan d'eau (voir tableau suivant) en considérant les apports par la Tardoire (172.8 m³/j sur 6 mois), le ruissellement périphérique ainsi que les pertes par infiltration (25 m³/j sur une surface de 3 ha, hors gouffre et faille) et l'évaporation (sur la base des ETP Penman). Elle évalue un volume excédentaire stocké de 18 000 m³, sur une superficie de 3 ha et un volume infiltré de 9 000 m³.

A noter que pour des raisons de biodiversité, la superficie du plan d'eau a été augmentée de 3 à 16 ha actuellement. Ce bilan théorique n'est donc plus à jour.

En m³/mois	JANV.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILL.	AOUT	SEPT	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL ANNUEL
PRISE D'EAU	5357	4838	5357	2592	0	0	0	0	0	2678	5184	5357	31363
RUISSELLEMENT	2 115	1 764	1 556	1 949	1 874	1 377	1 272	1 319	1 847	2 073	2 308	2 424	21 878
PERTE PAR INFILTRATION	-764	-690	-764	-740	-764	-740	-764	-764	-740	-764	-740	-764	-9000
PERTE PAR EVAPORATION	-459	-708	-1836	-2574	-3702	-4023	-4431	-4020	-2409	-1293	-537	-342	-26334
TOTAL	6 248	5 204	4 313	1 227	-2 592	-3 386	-3 924	-3 466	-1 302	2 694	6 216	6 675	17 907

2.7.2. Principe

Le principe consiste à étudier la réalimentation artificielle du système karstique de la Touvre par infiltration diffuse et différée de la Tardoire à partir des anciennes gravières.

Ce principe se base sur les hypothèses suivantes :

- que ces anciennes gravières sont connectées au système de la Touvre,
- que la réinfiltration puisse se faire de manière diffuse et différée,
- que le foncier puisse être maîtrisé par l'exploitant,
- que la dérivation de la Tardoire est possible réglementairement et techniquement.

Ces hypothèses méritent donc d'être vérifiées par des études de faisabilité.

Le but principal de ces études est de démontrer :

- la faisabilité de remplissage de ces anciennes gravières à partir d'un « seuil » hydraulique et réglementaire à définir et son effet positif sur les crues de la Tardoire en aval. On pourrait tout à fait envisager un débordement de la Tardoire tout au long de l'année à partir d'un certain seuil de hautes eaux, ce qui viendrait écrêter les crues de cette rivière y compris lors des forts événements plusieurs estivaux.
- Le réel effet sur le soutien du karst de la Touvre (capacité d'infiltration, stockage, effet de colmatage des plans d'eau...);
- L'effet retard introduit par une infiltration diffuse à partir du plan d'eau et d'un transfert d'eau vers l'aquifère.

Plusieurs gravières ont été identifiées en amont de La Rochefoucauld (voir figure suivante) et pourraient faire l'objet d'études de faisabilité. Ces gravières présentent des superficies de plusieurs hectares et des volumes potentiellement stockables supérieurs à 500 000 m³.

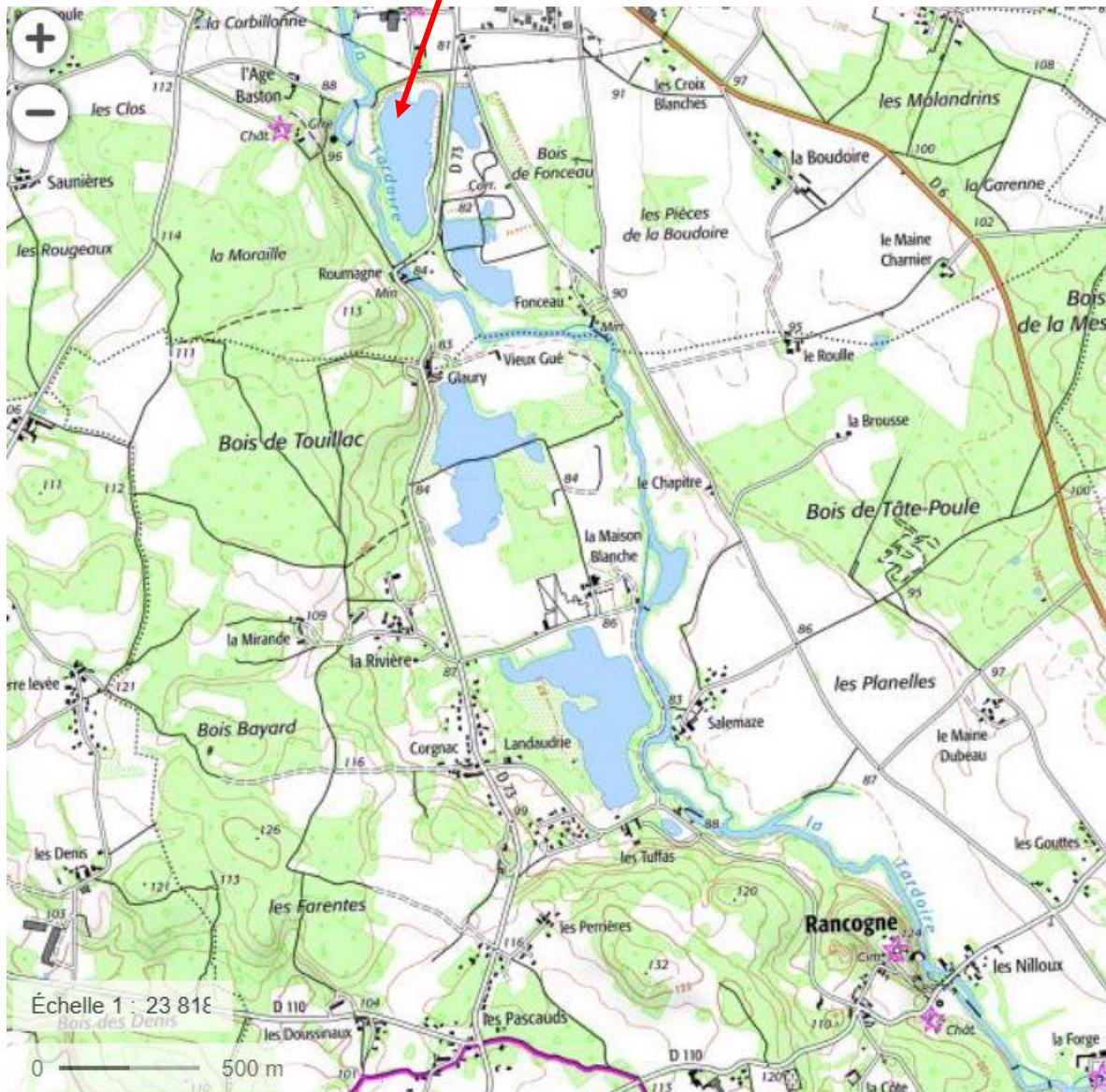


Figure 21 : Localisation et photo d'une deuxième gravière identifiée

2.7.3. Etude de solutions techniques

Les solutions techniques sont relativement simples et peu coûteuses.

En effet, ces gravières sont toutes situées à proximité de la Tardoire (< 100 m) et la réalisation d'ouvrage de dérivation est envisageable par des techniques simples (ouvrage de prise avec vanne automatisés, canalisation de prise et remplissage du plan d'eau par des ouvrages en cascade).

L'une ou l'autre des solutions dépendra de la topographie du site (berges, profondeur du plan d'eau, pentes...), du débit de dérivation et de la future gestion envisagée pour cet aménagement (gestion manuelle, pilotée, mesure des débits entrants...).

2.7.4. Avantages et inconvénients de la solution

Les avantages d'une telle solution sont multiples :

- Dévier une partie du flux d'eau superficiel en hautes eaux et le réguler vers des zones plus capacitives permettant de soutenir le débit d'étiage du système karstique.
- Proposer des aménagements simples et peu coûteux.
- Mettre en place des dispositifs modulables qui ont un impact positif sur la rivière en aval (écrêtement des crues).

Tableau 17 : Avantages et inconvénients du projet d'obstruction des conduits

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	L'avantage d'une telle solution réside dans la capacité de stockage évaluée à ce stade. En effet, ces anciennes gravières ont des superficies importantes (plusieurs hectares) et des profondeurs importantes (10-15 m) permettant un stockage d'eau supérieur à 500 000 m ³ . L'apport de ce stockage dans la recharge du système karstique est difficile à démontrer à ce stade. A ce stade des connaissances, il est impossible de quantifier l'apport de cette solution.	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	Chaque solution doit faire l'objet d'une étude de faisabilité technique qui permet d'adapter l'aménagement à mettre en place. Ces dispositifs sont en général composés par des ouvrages de prise (type buse) avec un ouvrage de dérivation vers le plan, muni ou non d'un dispositif de contrôle ou de régulation.	Il s'agit en général d'aménagements fixes et faisant appel à des techniques de génie civil (type seuil, canal, busage...). Une partie des berges de la rivière est donc artificialisée.
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	Ce type de solution dépend de la gestion mise en place entre la rivière et la gravière. Cette gestion peut être simple, c'est-à-dire à partir d'une cote de débordement calculée et validée par les services de l'Etat. Elle peut être modulable et pilotée en fonction de la fonctionnalité que l'on veut garantir au dispositif (écrêtement des crues d'occurrence donnée, maintien d'un niveau d'eau dans le plan d'eau, effet retard sur la recharge de l'aquifère...).	A ce stade des connaissances, on ne sait pas quantifier pas la recharge du système de la Touvre.
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »...)	Les retours d'expériences indiquent que ces aménagements sont étudiés pour être facilement modulables et permettent une répartition aisée des flux entre la rivière et le plan d'eau. Cette répartition peut se faire par des systèmes de vannes (manuelles ou automatiques) ou de trop-pleins déversant. Les flux peuvent être facilement contrôlés par des ouvrages de contrôle de type canal Venturi ou autre dispositif.	Il s'agit en général d'aménagements construits en génie civil et non réversibles facilement.
Coût	Le coût est difficile à évaluer à ce stade car il dépend du type d'aménagements que l'on pourrait mettre en place (merlon, seuil) et du foncier à acquérir. On peut s'attendre à des coûts inférieurs à 100 k€.	
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Des bilans hydrologiques accompagnés de traçages seraient nécessaires pour quantifier l'impact sur les sources et notamment le Bouillant. Cette étude devra permettre un contrôle de la qualité des eaux stockées et son évolution.	Le fait de dévier une partie du flux en hautes d'eau devrait engendrer une diminution du débit des sources pendant cette période (le % de diminution est difficile à estimer à ce stade), qui correspond en général à une période d'excédent d'eau et de besoins en eau potable moins importants.
Impacts sur les autres usages	Des études hydrauliques sont nécessaires afin de quantifier précisément l'impact d'une telle solution sur le régime hydrologique de la Tardoire.	Le principe est de dériver une partie du débit de la Tardoire en hautes eaux et de restituer en aval un débit réservé et biologique compatible avec les enjeux. Il faut mentionner que même si ces eaux ne sont pas dérivées, elles s'infiltrent plus ponctuellement et massivement dans les pertes identifiées sur la Tardoire en aval.
Impacts géotechniques	Tout aménagement devra faire l'objet d'une étude de faisabilité visant à démontrer la non-dégradation géotechnique notamment des berges par la mise en place d'aménagement durable.	
impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	La dynamique des ruisseaux va être perturbée temporairement et localement en aval de la prise d'eau aménagées. Une étude d'impact devra être menée afin de démontrer la non-perturbation hydraulique en aval des aménagements.	
impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine		
Contraintes réglementaires	Ces aménagements sont très probablement soumis au Code de l'Environnement. Un dossier loi sur l'eau devra être déposé en amont pour instruction par les services de l'Etat.	

2.8. Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par une réflexion sur les étangs et leurs débits réservés

2.8.1. Principes et historique de la solution étudiée (voir Annexe VI)

Cette solution propose d'augmenter la recharge du karst en pilotant les débits du Bandiat, de la Tardoire et de la Bonnière à travers la sollicitation des nombreux plans d'eau sur le domaine granitique en amont du karst.

Le principe de la solution consiste à modifier le bilan hydrique des apports d'eau sur le karst depuis les rivières en amont du karst. Le mécanisme actionné est celui de l'effacement ou de l'imposition de débits réservés sur les retenues d'eau de cette région.

Le déphasage des volumes d'eau ruisselant sur le bassin versant en amont du karst aboutit à un déphasage des eaux superficielles entrant dans le karst (cas d'un débit réservé) voire un volume supplémentaire (arrêt de la sur-évaporation dans le cas de l'effacement d'un étang). L'impact (combien et quand) de cette recharge sur les débits de la Touvre dépend de la fonction de transfert rivière -> sources de la Touvre, qui n'est pas connu avec certitude même si un temps de plusieurs jours est invoqué pour les pertes les plus importantes du système karstique.

[Une analyse détaillée de cette solution est présentée dans le cadre de l'Annexe VI : Gestion des apports depuis le domaine granitique](#)

2.8.2. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

2.8.3. Synthèse de la solution

Les 3240 retenues d'eau (tout usage confondu) recensées sur la partie cristalline du bassin d'alimentation du karst influencent l'hydrologie locale par rétention et évaporation. Le bilan hydrique prend en compte les précipitations et l'évaporation pour évaluer l'impact de ces plans d'eau sur le régime des cours d'eau. Deux points sont soulevés :

- Ces retenues consomment environ 2,5 Mm³ d'eau par an, un effet qui pourrait théoriquement être corrigé par la suppression de certaines retenues, bien que cette approche soit difficile à mettre en œuvre et peu justifiée par les seules quantités impliquées.
- Les retenues aggravent les débits d'étiage, réduisant les flux d'eau disponibles en période de faibles précipitations. Pour atténuer cet impact, il serait possible d'introduire des dispositifs de débit réservé, qui garantiraient une transparence hydraulique stricte dès que les débits naturels chutent sous 10 % du module, soit environ 1 m³/s pour l'ensemble du bassin versant de 761 km². L'ordre de grandeur de l'apport est d'environ 200 L/s à 600 L/s en pointe répartis sur le bassin versant à l'étiage.

Dans les deux cas, le caractère pilotable et réversible de la solution n'est pas assuré.

2.8.4. Incertitudes et études complémentaires

La durée du transfert rivière -> sources de la Touvre doit faire l'objet d'une étude complémentaire.

Tableau 18 : Avantages et inconvénients des solutions fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par une réflexion sur les étangs et leurs débits réservés

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	<p>Concernant la mise en place de débits réservés : Un ordre de grandeur optimiste, considérant un débit réservé égal à 10% du module des entrants sur chaque plan d'eau, est de l'ordre de 200 à 600 L/s en plus d'apports sur le karst en étiage. L'impact cette recharge supplémentaire à l'étiage sur les débits de la Touvre ne peut être estimé, ni quand, ni combien.</p> <p>Concernant l'effacement des étangs : L'impact cumulatif des plans d'eau sur le bassin versant amont du karst est un ordre de grandeur de « consommation » d'eau par sur-évaporation d'environ 2.5 Mm³. Il est difficile d'estimer quand comment ces volumes se répartissent dans le régime hydrologique de la Touvre.</p>	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	<p>Concernant la mise en place de débits réservés : Mise en place de dispositif de contournement des plans d'eau pour garantir la continuité hydraulique.</p> <p>Concernant l'effacement des étangs : Prévoir l'évacuation des sédiments et des difficultés techniques spécifiques pour chaque ouvrage afin de restaurer le milieu</p>	Le nombre de plans d'eau très important et la multiplication des acteurs rend la solution pragmatiquement très peu envisageable pour l'ensemble des ouvrages
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	Le karst agit dans cette solution comme un vecteur de transport de l'eau depuis le domaine granitique vers les sources de la Touvre. Aux vues des volumes et débits en jeu, il n'y a pas d'impact à prévoir.	Le délai et le taux de recouvrement de l'eau infiltré dans le karst par les pertes en rivière vers les sources de la Touvre n'est pas connue.
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »)	Sans objet	Les solutions ne sont pas pilotables et semblent difficilement réversibles.
Coût	<p>Concernant la mise en place de débits réservés : Le coût de ses opérations est très variable en fonction des exigences réglementaires (évacuation des sédiments en décharge par exemple) et des difficultés spécifiques de restauration du milieu après effacement.</p> <p>Concernant l'effacement des étangs : coût de quelques milliers d'euros selon le linéaire de court-circuit</p>	Sans objet
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Pas d'impacts significatifs	Sans objet
Impacts sur les autres usages	Concernant l'effacement des étangs, impact sur les usages agricoles si les retenues sont réservées pour l'irrigation	Sans objet
Impacts géotechniques	Sans objet	Sans objet
Impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	<p>Maintien des débits du Bandiat et du Tardoire à l'étiage</p> <p>Maintien des débits de la Touvre à l'étiage</p>	<p>Concernant le Bandiat et la Tardoire : les volumes en jeu ne permettent pas un maintien des rivières jusqu'à leurs exutoires dans la Charente. Il est peu probable que le linéaire assec soient considérablement modifié.</p> <p>Concernant la Touvre : Il est difficile d'évaluer l'impact sur les débits de la Touvre à l'étiage.</p>
Impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	Impact bénéfique sur le milieu en cas de maintien des débits Bandiat / Tardoire sur une période plus longue.	Sans objet
Contraintes réglementaires	Le projet (travaux et expérimentation) doit faire l'objet d'une concertation avec les services de l'Etat.	

2.9. Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par la création de retenue(s)

2.9.1. Principes et historique de la solution étudiée (voir Annexe VI)

Cette solution propose d'augmenter la recharge du karst en pilotant les débits du Bandiat, de la Tardoire et/ou de la Bonnière à travers la création d'un ouvrage de soutien d'étiage.

Le principe est d'accroître les débits d'eau provenant du domaine granitique en amont en captant et stockant les eaux excédentaires pendant les périodes de hautes eaux (principalement en hiver) grâce à la création de retenues. Ces réservoirs permettent de libérer progressivement l'eau stockée pendant les périodes de sécheresse, contribuant ainsi à stabiliser les débits en aval.

Plusieurs acteurs locaux ont évoqué cette solution, avec notamment l'existence d'un projet dans les années 1950. Ces acteurs ont des idées d'emplacements, sans en avoir communiqué la localisation exacte.

Les retenues sont conçues pour être situées dans des zones du bassin granitique propices au stockage, avec une gestion ajustée pour maintenir un débit de soutien pendant l'étiage, sans interférer avec la recharge naturelle du karst.

Cette option joue sur un remplissage en période d'abondance hydrologique et une restitution de l'eau en période d'étiage.

[Une analyse détaillée de cette solution est présentée dans le cadre de l'Annexe VI : Gestion des apports depuis le domaine granitique](#)

2.9.2. Avantages et inconvénients de la solution

Le tableau en page suivante résume les avantages/inconvénients d'une telle solution.

2.9.3. Synthèse de la solution

Deux fonctions principales peuvent être envisagées : la création d'un stock de substitution (réduit la pression de prélèvements directs en période sèche) et le soutien direct des débits en étiage, surtout en période de bas niveaux hydriques. La faible pression d'usage en amont du karst limite l'efficacité de la première solution ; c'est la seconde qui est principalement étudiée.

Des ordres de grandeurs sont proposés : pour remplir une retenue de 1 Mm³ il faudrait intercepter un bassin versant de 5 km². Avec ce volume, on peut lâcher 250 L/s pendant 3 mois. Des réservoirs de plus grande capacité (jusqu'à 5 Mm³) pourraient apporter un soutien plus significatif, en interceptant un bassin d'au moins 25 km².

Il est illusoire de penser que cet apport soit suffisant pour maintenir en eau le Bandiat et la Tardoire pendant l'étiage. Ainsi, l'objectif de la solution est bien d'alimenter le karst, et indirectement la Touvre. L'effet de soutien d'étiage sur la Touvre est donc probablement inférieur aux 250 L/s, en fonction de l'efficacité du transfert rivière – exutoire aux sources.

Le soutien des débits d'étiage pourrait renforcer les étiages et alimenter positivement le karst. Cependant, cela peut aussi réduire les écoulements en reprise après la période sèche, nécessitant des ajustements dans la gestion des lâchers pour éviter des chutes de niveau.

La qualité de l'eau dans les retenues, influencée par le bassin versant en amont, est cruciale en raison des risques de développement de cyanobactéries, qui pourraient compromettre l'usage potable de l'eau issue du karst

La non-étanchéité potentielle de certaines zones géologiques et les coûts d'étanchéification limitent les sites d'implantation favorables pour de telles retenues.

Le coût d'investissement est estimé entre 6 à 7 millions €/Mm³, avec des coûts annuels de gestion autour de 25 000 €/Mm³, rendant la faisabilité économique et le financement complexe. Les bénéfices doivent être équilibrés avec les coûts et le cadre environnemental exigeant.

En somme, la solution de retenue présente des opportunités pour le soutien en période d'étiage, mais elle est limitée par des défis de faisabilité technique, économique et environnementale. Elle est de plus non réversible.

2.9.4. Incertitudes et études complémentaires

On note la particularité de cette solution indirecte par rapport à un soutien d'étiage classique, qui doit être mis en regard d'autres solutions en dehors du périmètre du karst (exemple de travaux sur des nouvelles retenues ou des retenues existantes permettant d'alimenter directement la Charente sans l'entremise du karst).

Une autre difficulté est liée au temps séparant l'action sur le haut bassin versant (remplissage et lâchers) et à son impact sur les débits de la Touvre. Rien ne garantit que toute l'eau lâchée participe aux débits de la Touvre dans la période souhaitée. Les fonctions de transfert constituent donc le principal frein scientifique à l'évaluation de l'utilité de cette solution.

Décider l'emplacement d'un ouvrage de 1 Mm³ à 5 Mm³ sur un territoire nécessite des analyses croisées complexes pour tenir compte des enjeux diverses : hydrologiques bien sûr, mais aussi environnementaux, sociétaux, politiques, etc. Ces études sont complexes et nécessitent de longues phases de concertations. Pour exemple, le département de la Haute-Garonne porte une réflexion de cette nature depuis 2007 (étude Sogreah) qui se poursuit encore aujourd'hui (étude Eaucéa 2024).

En l'absence de mission et de cadrage clair, il n'est pas envisageable à ce stade de proposer des localisations pour ce type d'ouvrage.

Tableau 19 : Avantages et inconvénients sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique par la création de retenue(s)

Volet	Avantages	Inconvénients
Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké dans le karst ...)	Un réservoir de 1 Mm ³ pourrait fournir un débit de soutien de 250 L/s sur environ trois mois, tandis qu'une retenue de 5 Mm ³ augmenterait significativement cet impact en couvrant un bassin versant d'au moins 25 km ²	
Faisabilité technique (type de travaux, génie civil, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences...) - Artificialisation	Un ratio classique et empirique de l'emprise d'une retenue donne les chiffres suivants : - Une surface d'environ 10 Ha pour 1 Mm ³ - Une surface d'environ 40 Ha pour 2 Mm ³ - > 60 Ha pour 5 Mm ³	Artificialisation forte du site de retenue. Enjeux politiques, sociétaux et environnementaux forts à prévoir
Influence sur le karst (remontée du niveau piézométrique, périmètre d'influence, compatibilité avec le fonctionnement du karst et des sources, activation de trop-pleins)	Le karst agit dans cette solution comme un vecteur de transport de l'eau depuis le domaine granitique vers les sources de la Touvre. Aux vues des volumes et débits en jeu, il n'y a pas d'impact à prévoir.	Le délai et l'efficacité de l'eau infiltré dans le karst par les pertes en rivière vers les sources de la Touvre n'est pas connue.
Facilité de gestion du dispositif et sa réversibilité (aspect modulable, mise en place et retrait progressifs, maîtrise du débit retenu/lâché, délai de retrait « d'urgence »)	Solution pilotable, dans la limite de la connaissance du temps de transfert perte Bandiat/Tardoire -> source de la Touvre	<u>Solutions irréversibles.</u>
Coût	Sans objet	La question du coût très dépendante de certaines règles telles que le volume stocké/ emprise des ouvrages (hauteur et longueur et volume de la digue) ; le coût d'un ouvrage est donc dépendant des conditions d'implantations et des contraintes de chaque site. Néanmoins il peut être retenu un coût d'investissement de l'ordre de 6 à 7M€/1Mm ³ auquel doit se rajouter des coûts de gestion qui peuvent être évalués sur la base de retour d'expérience à environ 25 000€/an/1Mm ³ .
Impacts sur le captage AEP de la Touvre	Sans objet	Impact possible sur la qualité des eaux nécessitant des investissements de la part des acteurs AEP
Impacts sur les autres usages	Sans objet	Sans objet
Impacts géotechniques	Sans objet	Sans objet
Impacts sur les rivières (Bandiat, Tardoire, Touvre)	Aide au maintien des débits du Bandiat et du Tardoire à l'étiage Maintien des débits de la Touvre à l'étiage	Concernant le Bandiat et la Tardoire : les volumes en jeu ne permettent pas un maintien des rivières jusqu'à leurs exutoires dans la Charente. Il est peu probable que le linéaire assec soient considérablement modifié. Concernant la Touvre : Il est difficile d'évaluer l'impact sur les débits de la Touvre à l'étiage.
Impacts sur la faune et la flore, sur le paysage, sur le tourisme et le patrimoine	Impact touristique positif en cas de retenue multi-usages	Les limitations environnementales qui couvrent plusieurs enjeux : - Les enjeux dans l'emprise du futur plan d'eau (enjeux naturels ou humains comme une route par exemple) - Les enjeux du stockage de l'eau et de sa qualité, très dépendante de l'occupation du bassin versant en amont de la retenue. Cette question présente une acuité particulière dans le cas présent puisque le bassin amont cristallin est favorable à des développements de cynobactéries dans les retenues et que l'un des usages majeurs de la ressource du Karst est la production d'eau potable. Les enjeux de la rupture de continuité écologique et hydraulique induite par l'ouvrage sur le cours d'eau.
Contraintes réglementaires	Le projet doit faire l'objet d'une concertation avec les services de l'Etat et d'une concertation publique.	

2.10. Solution fondée sur la surexploitation du système karstique

2.10.1. Historique

Dans les années 70, l'agence de bassin (aujourd'hui l'Agence de l'Eau Adour Garonne) a lancé une étude visant à étudier les possibilités de surexploitation du karst de la Touvre, dont le but était principalement un soutien d'étiage de la Charente.

Cette étude était motivée par l'apparition de conflits d'usage sur le secteur, suite notamment à la succession de périodes de sécheresse des années 70.

Cette étude a été confiée au professeur M. VOUBE, de l'Université de Bordeaux, connu notamment pour ces connaissances géologiques du secteur sédimentaire de l'Aquitaine.

Cette étude se décompose en 3 volets :

- 1 volet d'étude géologique
- 1 volet d'étude hydrogéologique
- 1 volet de chiffrage des solutions potentielles de surexploitation.

Il est important de noter que la connaissance géologique et hydrogéologique du système karstique de la Touvre n'était pas aussi avancée à cette époque que maintenant. En effet, la réalisation de plusieurs travaux depuis les années 1970 (2 thèses, synthèse BRGM, études locales de bureaux d'études, traçages...) ainsi que l'apport de connaissance à travers la réalisation de forages (AEP, irrigation...) ont amené des connaissances importantes dans la géométrie du système et son fonctionnement. Il en va de même pour la géométrie des émergences, dont l'exploration se poursuit actuellement et dont la connaissance n'était pas aussi avancée dans les années 1970.

De ce fait, les études (volet 1 et 2) menées par M. VOUBE n'amènent de conclusions importantes sur la géométrie de l'aquifère et donc sur l'opportunité de surpompage.

M. VOUBE évoque plusieurs solutions techniques, notamment la réalisation de pompage dans la zone noyée du karst reconnue dans plusieurs fosses du secteur (fosse mobile, aven du Bois du Clos) ainsi que par la foration de quelques forages profonds de reconnaissance sur 2/3 secteurs amont du système. L'objectif étant de solliciter l'aquifère profond et capacitif de la Touvre, recoupé par quelques forages existants.

Le chiffrage de telles solutions a été réalisé mais s'avère totalement obsolète actuellement. Le coût envisagé a été évalué à 1,2 million de francs ce qui représenterait approximativement 1,8 million d'euros en 2025.

2.10.2. Principe

Le principe de surexploitation consiste à exploiter de manière optimale la ressource en eau. En effet, il s'agit de pomper, en saison sèche, à un débit supérieur au débit d'étiage, afin de solliciter les réserves de l'aquifère. Celles-ci se reconstituent lors de la saison des pluies suivante avec pour conséquence une diminution de l'intensité des crues au début de l'automne. Par ailleurs, le système contribue au soutien d'étiage par une partie des eaux pompées qui permet le maintien d'un débit réservé. Cette gestion multi-usages répond donc de manière intégrée à ces problématiques en apparence antagonistes : besoins supplémentaires pour l'AEP, réduction des risques d'inondation et soutien d'étiage.

Ce principe a été mis en place pour l'aquifère karstique du Lez, principale source d'approvisionnement en eau potable de Montpellier Métropole. Les observations à la source du Lez indiquent qu'après la baisse du niveau d'eau durant l'été, celui-ci remonte chaque automne au niveau du seuil de la vasque qui déborde. Le taux d'exploitation actuel de l'aquifère est donc inférieur ou en équilibre avec la ressource renouvelable.

Figure 22 : Schéma d'installation de l'usine de pompage du Lez

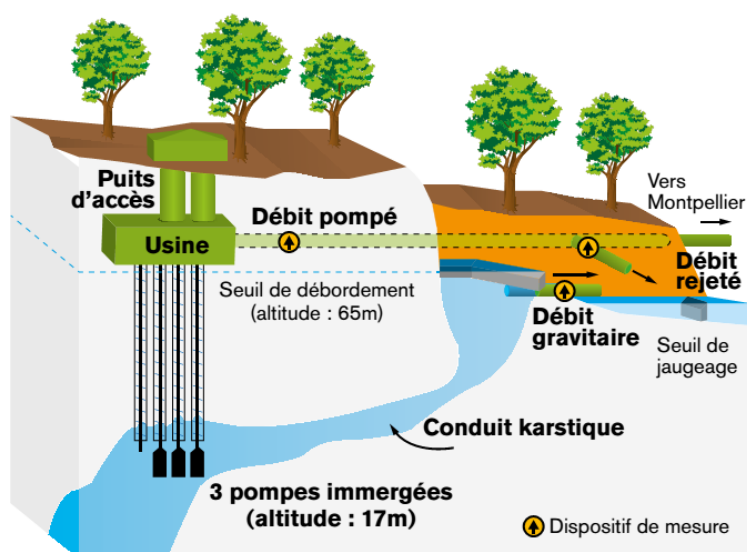


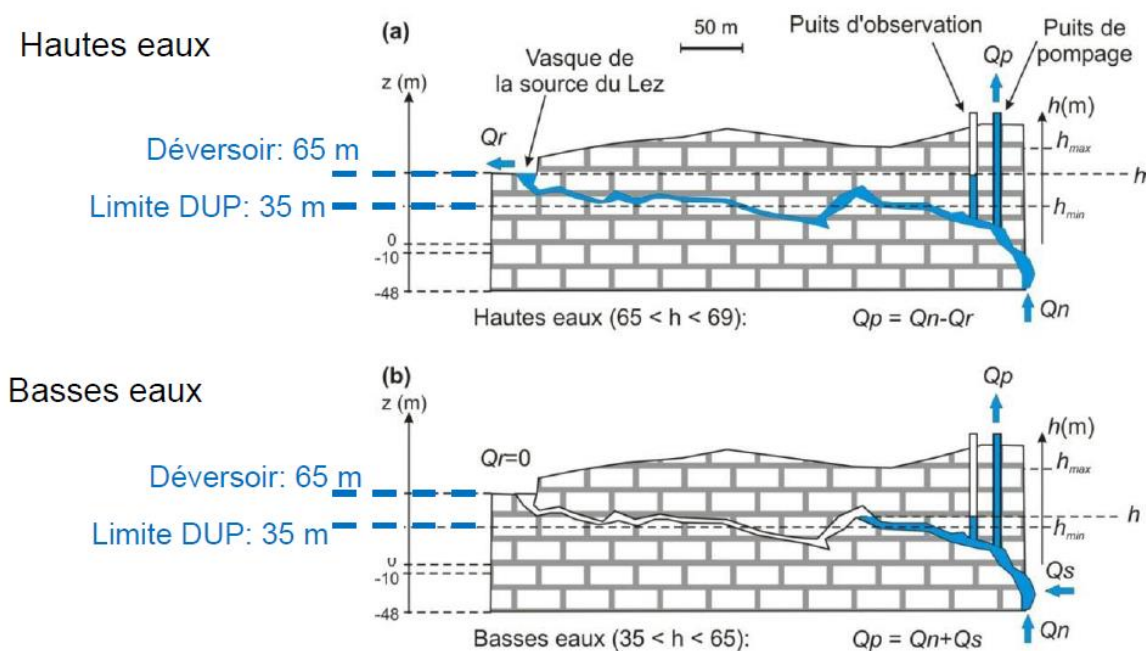
Figure 1 : coupe de l'installation de l'usine de pompage à la source du Lez

Le fonctionnement à la source a été décrit par le BRGM en considérant deux périodes différentes (voir Figure 20 - voir Annexe 1, référence 21).

- **En hautes eaux**, on observe un débit résiduel de débordement à la source (Q_r). Les pompages ne sollicitent pas les réserves du karst et le débit pompé (Q_p) correspond à une partie du débit naturel (Q_n) qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage.
- **En basses eaux**, le débit de pompage (Q_p) est supérieur au débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n). Il provoque alors le tarissement de la source ($Q_r = 0$). Lors de ces périodes, Q_p s'interprète comme la somme du débit qui se serait naturellement écoulé en absence de pompage (Q_n) et du débit des réserves sollicitées ($|Q_s| = Q_p - Q_n$). Le débit Q_s s'interprète comme la somme du déstockage des drains karstiques et de la mobilisation de l'eau de la matrice carbonatée.

Les pompages mobilisent donc les réserves en eau du système karstique, peu ou pas accessibles en conditions naturelles de fonctionnement. Ce phénomène se traduit par une diminution de la charge piézométrique dans le drain karstique et un tarissement de la source ($Q_r = 0$).

Figure 23 : Schéma de fonctionnement du système du LEZ



2.10.3. Caractéristiques du système de la Touvre

L'analyse des données bibliographiques nous ont amené à proposer une solution de surexploitation du système de la Touvre pour les raisons suivantes :

- L'étude des courbes de récession effectuées au cours des différentes études a montré l'importance du **volume dynamique du réservoir de la Touvre, estimé autour de 200 Mm³** d'eau. En comparaison des autres systèmes karstiques, ce volume est très élevé et montre l'importance des volumes d'eau en mouvement dans le système. Il correspond en effet à la vidange du réservoir en régime non influencé, sans prise en compte des possibles réserves situées sous le niveau de l'exutoire.
- Cette approche a permis également de décrire la fonctionnalité de cet aquifère et de démontrer qu'il possédait **un important pouvoir régulateur, lié notamment à des durées d'infiltration très longues (158 jours)**, conséquence d'une alimentation binaire du système (infiltration diffuse sur le Grand Karst et plus concentrée en provenance des bassins versants non karstiques).
- Les analyses statistiques (analyses corrélatoires) ont également démontré **une très bonne inertie du système avec un effet mémoire très important (> 100 jours)** caractéristique d'un karst très capacitif (voire l'un des plus capacitif de France – voir figure 21).
- Les études récentes mettent en évidence **le compartimentage de l'aquifère avec la présence d'une zone capacitive profonde** (voir figure 22), dont une partie des eaux pourrait échapper au système de la Touvre.

Figure 24 : Classification des systèmes karstiques à partir des analyses corrélatoires


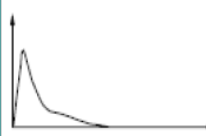
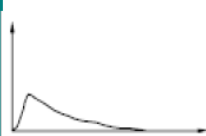

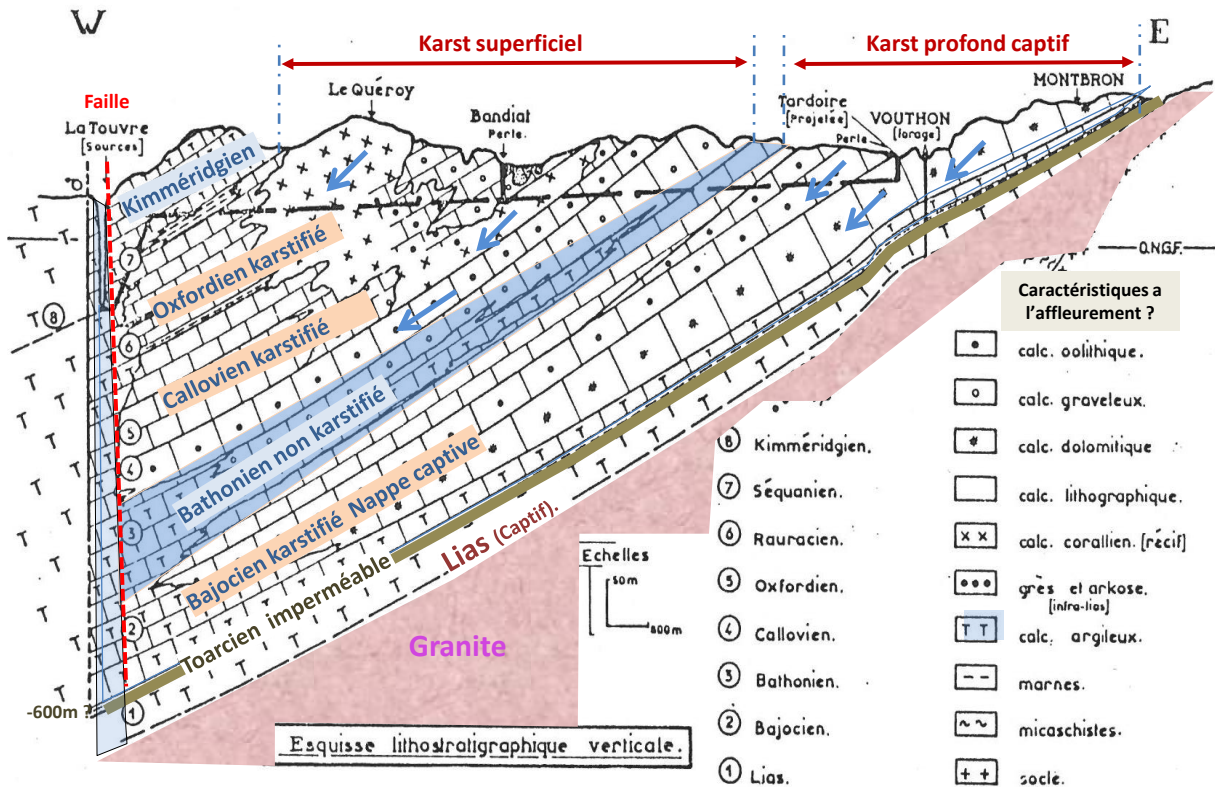
Types	Effet mémoire (Rk=0,2)	Fréquence de coupure	Temps de régulation	Réponse impulsionnelle
ALIOU	Réduit (5 jours)	Très haute (0,30)	10 à 15 jours	
BAGET	Petit (10 à 15 jours)	Haute (0,20)	20 à 30 jours	
FONTESTORBES	Grand (50 à 60 jours)	Basse (0,10)	50 jours	
TORCAL	Considérable (70 jours)	Très basse (0,05)	70 jours	

Figure 25 : Structure géologique du karst de La Rochefoucauld (d'après Vouvé 1970 repris par SEGUIN)



2.10.4. Application au système de la Touvre

Plusieurs solutions peuvent envisager à des fins de surexploitation de ce système inertiel et très capacitif. La surexploitation se fait habituellement par pompage à gros débit, dans les zones très capacitives du système karstique et en dehors du système de drainage.

La réflexion porte donc essentiellement sur la localisation du dispositif de pompage soit au niveau :

- Des zones capacitives profondes, afin de solliciter l'aquifère profond contenu dans les formations géologiques du Bajocien ;
- Des zones capacitives latérales et éloignées des axes de drainage (zones annexes au drainage).

Les zones identifiées se portent en général sur (voir figure 9) :

- Des regards de la zone noyée du karst, à travers les reconnaissances effectuées par les spéléologues locaux (fosses mobiles par exemple...) ;
- Des forages profonds, non utilisés et aptes à pouvoir être testés (diamètre de l'équipement suffisant et adapté) ;
- La zone noyée au plus proche et au point bas des émergences, notamment en cas de sources vaclusiennes.
- Les secteurs les plus proches du réseau ou de la rivière à alimenter (pour des raisons d'acceptation économique).

Comme pour les solutions précédentes, une expérimentation préalable sera nécessaire afin de dimensionner le dispositif et de tester les fonctionnalités de l'aquifère karstique et notamment l'importance des réserves. Cette expérimentation se base notamment sur la réalisation d'un essai par pompage à gros débit (plusieurs centaines de m³/h) et de très longue durée (plusieurs mois).

Les solutions envisageables sont les suivantes :

- **Mise en place d'un système de pompage complémentaire au dispositif actuel AEP** et permettant de surexploiter le système noyé tout en garantissant l'alimentation en eau des abonnés. Il s'agit du dispositif type, mise en place sur la source du Lez. Cette solution a un avantage important, c'est de profiter de la gestion hydraulique et électrique actuelle, en place sur l'usine d'eau potable de Touvre. L'idée serait de seconder le système de pompage AEP par une pompe immergée complémentaire et permettant de solliciter les différentes réserves du karst.
- **Mise en place d'un système de pompage dans une forage profond, existant ou à créer**, dans le but de tester les réserves de l'aquifère. Le piézomètre de Mornac, même s'il est éloigné des sources de la Touvre (1 700 m), pourrait présenter un intérêt de par sa profondeur (158 m).
- **Mise en place d'un système de pompage dans un regard de la zone noyée du karst**, notamment les différentes fosses inventoriées sur le karst de la Rochefoucauld (Fosse Mobile, Grande Fosse, Bois du Clos). Ces points présentent l'inconvénient d'être éloignés du réseau hydrologique et de toute alimentation électrique.
- **Rejet dans le ruisseau de la Touvre ou un de ses affluents**

Ces solutions ne sont envisageables que dans la mesure où on définit précisément les modalités de recharge de l'aquifère et la façon dont les réserves vont se reconstituer au cours des cycles hydrologiques. Le régime hydraulique du système de la Touvre semble constitué d'une alternance de cycles déficitaires et excédentaires, directement fonction de l'apport de la pluviométrie hivernale et printanière sur l'ensemble de l'aire d'alimentation.

2.10.5. Avantages et inconvénients de la solution

Les avantages et inconvénients d'une telle solution sont difficiles à évaluer à stade, ne disposant pas des paramètres qui régissent le dispositif de pompage (localisation, débit, pompage dans un forage ou réseau karstique naturel...).

On peut néanmoins énoncer les éléments suivants :

- **Les avantages d'une telle solution** résident dans la capacité du système karstique à mobiliser des réserves annexes, non sollicitées actuellement par différents usages. L'idée serait donc d'exploiter conjointement un volume d'eau qui serait réparti entre plusieurs usages, l'un pour l'eau potable et l'autre pour le soutien d'étiage. La définition et quantification des impacts passe obligatoirement par la mise en œuvre d'un essai par pompage avec suivi de différents points d'eau. Cet essai permet également de définir le périmètre d'influence du pompage et la fonctionnalité du système (débit de réalimentation, sollicitations de réserves et interconnexion...).
- **Les inconvénients d'une telle solution** résident dans l'utilisation d'énergie (électrique) pour pomper le volume d'eau nécessaire au soutien d'étiage. Comme pour la Communauté d'Agglomération de Montpellier, cela nécessite une gestion technique et financière très rigoureuse, permettant d'encadrer le dispositif de pompage. D'autre part, les inconnues sur les mécanismes de recharge ne nous permettent pas d'évaluer les risques de non-reconstitution des réserves et donc d'évaluer l'impact interannuel d'une telle solution sur la ressource des karsts superficiel et profond/capacitif.

2.10.6. Synthèse de la solution de surexploitation

La mise en place d'un dispositif de surexploitation pourrait être envisagé sur le karst de la Touvre, au niveau de zones capacitatives recoupées par forage ou dans des regards vers la zone noyée du karst.

Le dimensionnement et la faisabilité de tel dispositif demande en préalable de tester l'aquifère, à travers des essais par pompage de très longue durée et à très fort débit. Ce test permettrait alors de définir la capacité des réserves mobilisables par pompage et d'estimer l'influence d'un tel dispositif sur l'aquifère et les usages.

Plusieurs solutions ont été mises en évidence comme l'installation d'un dispositif complémentaire de pompage dans l'émergence captée du Bouillant. Ce double dispositif permettrait de maintenir l'alimentation en eau potable des abonnés et de prélever le surplus d'eau pour le soutien d'étiage. Cette solution a l'avantage de profiter des installations actuelles du Grand Angoulême. Le volume d'eau ainsi mobilisé pourrait être relargué dans le ruisseau de la Touvre en aval et en fonction du débit mesuré à Foulpougne.

Ces solutions se heurtent à la prise en charge de la gestion technique et financière d'un tel dispositif.

3. Etape 3 : Comparaison des solutions

3.1. Principes

Une analyse comparative des solutions a été menée (voir tableau 20) à partir de plusieurs critères, rappelés dans le tableau 19 suivant. Les critères seront à rediscuter avec les acteurs locaux et les experts.

Critère 1	Impacts potentiels/risques	Ce critère rend compte de l'estimation des impacts potentiels sur les usages (amont-aval) et de manière globale sur l'environnement (milieu hydrologique, faune/flore...)
Critère 2	Réversibilité des solutions	Le critère de réversibilité permet de valider la réversibilité de la solution (caractère modulable et progressif, retrait d'urgence ...)
Critère 3	Faisabilité technique	Ce critère expose les contraintes liées aux travaux (artificialisation, intervention dans le lit de la Touvre et/ou dans les émergences, comptabilité avec les périmètres de protection...) ainsi que les difficultés de mise en place et d'installation
Critère 4	Efficacité	Capacité du dispositif à répondre aux objectifs fixés (volume stocké et déstocké dans le karst)
Critère 5	Facilité de gestion	Ce critère rapporte aux difficultés de gestion de la solution provisoire et pérenne, notamment la nécessité de recourir à une énergie électrique et une maintenance régulière
Critère 6	Retours d'expérience	Ce critère dépeint l'absence ou l'existence de retours d'expériences
Critère 7	Coût	Estimation d'une enveloppe budgétaire

Tableau 20 : Principes retenus à partir des retours d'expériences et de l'analyse bibliographique

3.2. Analyse comparative

Le tableau suivant permet de comparer les différentes solutions selon leur compatibilité au critère considéré. Le signe ? est indiqué lorsqu'il est impossible de se prononcer.

Critère très favorable	Critère favorable	Critère moyennement favorable	Critère peu favorable	Critère le moins favorable
5	4	3	2	1

Tableau 21 : Analyse comparative des solutions

		Efficacité, potentielle et estimée	Faisabilité technique	Facilité de gestion	Coût	Impacts potentiels, risques	Réversibilité	Existence de retours d'expérience	TOTAL
Solutions A : Solutions permettant de ralentir et/ou retarder la vidange du karst									
Solution 1 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau des sources (diguettes)		4	3	4	3	3	5	3	25
Solution 2 Solutions fondées sur la nature à l'aval immédiat des résurgences	Gestion des herbiers	2	4	4	5	5	5	3	28
	Restauration hydromorpho	1	2	4	2	3	1	3	16
Solution 3 Solution fondée sur la surélévation du fil d'eau de la Touvre par la rehausse du seuil existant		3	2	3	1	2	1	5	17
Solution 4 Solution fondée sur l'obstruction partielle des conduits karstiques		5	2	3	4	1	4	1	20
Solutions B : Solutions permettant de favoriser la recharge du karst									
Solution 5 Solution fondée sur l'infiltration diffuse des eaux	Aménagement de pertes	2	4	3	3	4	2	3	21
	Réalimentation artificielle des gravières	5	4	4	4	4	2	4	27
Solution 6 Solution fondée sur l'augmentation des débits provenant du domaine granitique	Par une réflexion sur les étangs et leurs débits réservés	2	3	3	3	4	1	5	21
	par la création de retenue(s)	4	2	4	1	1	1	5	18
Solution C : Solutions permettant de surexploiter le karst									
Solution 7 Solution fondée sur la surexploitation de l'aquifère		4	3	2	1	?	4	5	19

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/fr/annexes>



ANNEXES

- Annexe I : Bibliographie
- Annexe II : Compte-rendu des entretiens avec les experts
- Annexe III : Compte-rendu des entretiens avec les acteurs du territoire
- Annexe IV : Etude de la solution visant à piloter la vidange par l'aval
- Annexe V : Etude technique de la solution de surélévation du fil d'eau à l'aval des sources de la Touvre
- Annexe VI : Etude technique de la solution d'obturation des conduits karstiques
- Annexe VII : Etude de la gestion des apports depuis le domaine granitique

Annexe I : Bibliographie

Compilation de données bibliographiques recueillies par ANTEA et donné aimablement par Nicolas Frissant du BRGM – 2024.

1. Ahmed, M.F., Omed, Y., Raza, M.A., 2016. Groudwater dams, general characteristics and historical development 8.
2. Arfib, B., Charlier, J.-B., 2016. Insights into saline intrusion and freshwater resources in coastal karstic aquifers using a lumped Rainfall–Discharge–Salinity model (the Port-Miou brackish spring, SE France). *J. Hydrol.* 540, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.010>
3. Arroisi, R., 2010. World's First Underground Dams In Indonesia. *goodnewsfromindonesia*.
4. Association "ranimons la Cascade de Salles la Source, 2015. Ranimons la Cascade de Salles-la-Source ! [WWW Document]. URL <https://www.ranimons-la-cascade.fr/> (accessed 9.22.23).
5. Bakalowicz (1999)- Connaissance et gestion des ressources souterraines en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3
6. Bakalowicz Michel June 2011 Karst Management - In book: Karst Management (pp.263-282) DOI:10.1007/978-94-007-1207-2_12
7. Bakalowicz Michel Janvier 2006 - Analyse des possibilités de recharge artificielle dans un aquifère karstique. Approche théorique et analyse d'un site potentiel d'injection. Le site de Hazmieh – Hadeth, Beyrouth, Liban.
8. Bank, A.D., 2022. Burkina Faso - études intégrées de valorisation du barrage souterrain de nare et réhabilitation des infrastructures connexes (cas de résilience a la forte désertification et dégradation dans un contexte de changement climatique dans le sahel) - RAP [WWW Document]. *Afr. Dev. Bank - Build. Today Better Afr. Tomorrow*. URL <https://www.afdb.org/en/documents/burkina-faso-etudes-integrees-de-valorisation-du-barrage-souterrain-de-nare-et-rehabilitation-des-infrastructures-connexes-cas-de-resilience-la-forte-desertification-et-degradation-dans-un-contexte-de-changement-climatique-dans-le-sahel-rap> (accessed 3.3.23).
9. Blavoux, B., Gilli, É., Rousset, C., 2004. Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille–Cassis). Principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien. *Comptes Rendus Geosci.* 336, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.10.027>
10. Bonacci, O., 2004. Hazards caused by natural and anthropogenic changes of catchment area in karst. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 4, 655–661. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-655-2004>
11. Burdon, D.J., Papakis, N., 1963. Handbook of karst hydrogeology. *Inst. Geol. Subsurf. Res. Athens*.
12. Centre d'étude du Karst, 1995. Barrage souterrain de Luceram (Alpes Maritimes). France, Alpes Maritimes.
13. Daher W. et al (2011) – Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problems - A preliminary approach to artificial recharge assessment - *Journal of Hydrology*
14. Detay, M., 2007. La gestion active des hydrosystèmes: de nouveaux paradigmes. <https://doi.org/10.13140/2.1.2079.8407>
15. Ford DC, Williams PW (1989) Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman Ltd, London GDF-SUEZ, 2008. Une centrale hydroélectrique à 700 m sous terre.

16. Jeannin, P., Maréchal J. (1995) - Lois de pertes de charge dans les conduits karstiques : base théorique et observations - Bulletin du centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, vol. 14, 149-176.
17. Gilli, E., Mangan, C., 1994. Le prototype de Coaraze (Alpes-Maritimes) Exemple de création d'une réserve d'eau souterraine par obturation d'une source karstique. *Karstologia* 24, 37–40. <https://doi.org/10.3406/karst.1994.2340>
18. Jemcov, I., Milanović, S., Milanović, P.T., Dašić, T., 2011. Analysis of the utility and management of karst underground reservoirs: case study of the Perućac karst spring. *Carbonates Evaporites* 26, 61–68. <https://doi.org/10.1007/s13146-011-0048-3>
19. Kang, Y., Zhang, B., 2002. Karst and engineering handling to the karst in Wulichong Reservoir, Yunnan Province. *Carsologica Sin. Inst. Karst Geol. Guilin China* 21, 120–130.
20. Lu, Y., 1986. Karst in China: landscapes, types, rules. Geological Publishing House.
21. Ladouche B., Caballero Y., Maréchal J.C., Évaluation de l'impact du changement global sur la ressource en eau souterraine du système karstique du Lez
22. Margat, J., 1998. Les eaux souterraines dans le bassin méditerranéen : Ressources et utilisations. *Eaux Souterraines. Dans Bassin Méditerranéen Ressource Utile.*
23. Milanovic, P., 2018. *Engineering Karstology of Dams and Reservoirs.* CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429453403>
24. Milanovic, P., 2015. Karst of eastern Herzegovina, the Dubrovnik littoral and western Montenegro. *Environ. Earth Sci.* 74, 15–35. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3923-0>
25. Milanovic, P., 2011. Dams and Reservoirs in Karst, in: van Beynen, P.E. (Ed.), *Karst Management.* Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 47–73. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1207-2_3
26. Milanovic, P., 2004. *Water Resources Engineering in Karst,* CRC Press UK. ed, CRC Press UK. CRC Press, Boca Raton.
27. Milanovic, P., 1984. *Hydrogeology of Dinaric karst.*
28. Milanovic, P.T., 2000. *Geological Engineering in Karst: Dams, Reservoirs, Grouting Groundwater Protection, Water Tapping, Tunneling.* Zebra.
29. Milanovic, P.T., 1988. Artificial underground reservoirs in the karst experimental and project examples. *IAHS-AISH Publ.* 176, 76–87.
30. Nishigaki, M., Kankam-Yeboah, K., Komatsu, M., 2004. Underground dam technology in some parts of the world. *J. Groundw. Hydrol.* 46, 113–130. <https://doi.org/10.5917/jagh1987.46.113>
31. OZCELIK, M., 2023. Evaluation Of Suitability Of Antalya (Turkey) Karst Travertine Plateau For Underground Dam. *PIONEER Contemp. Stud. Eng.* 187–204.
32. Pavlin, B., 1973. Establishment of subsurface Dams and utilization of natural subsurface Barriers for realization of underground storage in the coastal karst spring zones and their protection against seawater intrusion. *Comm. Int. Gd. Barrages 11ème Congrès* 487–501.
33. Peric, J., 1963. Underground reservoirs as structures for artificial water retardation behind karst springs. *Eng. Geol. Hydrogeol. Inst. Geol. Geophys. Belgrade III B.*
34. Roje-Bonacci, T., Bonacci, O., 2013. The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 2041–2052. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2041-2013>

35. sever, Z., 2022. Ombla multipurpose hydropower system, Reclaiming The Underground Space - Volume 1. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203741184-11>
36. sever, Z., 2003. Ombla multipurpose hydropower system, in: Claiming the Underground Space.
37. SMBV2A, 2020 - Trou du Souci : point final à un contentieux de plus de 250 ans
38. Stevanović, Z., 2018. Global distribution and use of water from karst aquifers. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 466, 217–236. <https://doi.org/10.1144/SP466.17>
39. Stevanović, Z., 2015. Damming underground flow to enhance recharge of karst aquifers in the arid and semi-arid worlds. Environ. Earth Sci. 75, 35. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5086-z>
40. Stevanovic, Z., 2015. Damming underground flow to enhance recharge of karst aquifers in the arid and semi-arid worlds. Environ. Earth Sci. 75, 35. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5086-z>
41. Sun, Y., Xu, S.G., Kang, P.P., Fu, Y.Z., Wang, T.X., 2019. Impacts of Artificial Underground Reservoir on Groundwater Environment in the Reservoir and Downstream Area. Int. J. Environ. Res. Public Health 16, 1921. <https://doi.org/10.3390/ijerph16111921>
42. VOI, 2021. Getting To Know The Bribin Underground Dam, A Solution To Overcoming Drought In Gunung Kidul [WWW Document]. VOI - Waktunya Merevolusi Pemberitaan. URL <https://voi.id/en/news/41621> (accessed 10.9.23).
43. Yoshikawa, M., Shokohifard, G., 1993. Underground dams: A new technology for groundwater resources development, in: Proceedings of Articles of International Karst Symposium. Shiraz, Iran.
44. Yuan, D., 1990a. Construction of underground dams on subterranean streams in South China Karst. Inst. Karst Geol. Guilin 62–72.
45. Yuan, D., 1990b. Construction of underground dams on subterranean streams in South China Karst. Inst. Karst Geol. Guilin 62–72.
46. Zhang, B., Wu, M., 2000. Seepage control treatment of blind valley reservoir. Hydroelectr. Power Constr. Eng. Consult. Co. Gao Yaoji Yunnan Prov. China.

Livres

Milanovic´ PT (2021) Engineering Karstology of Dams and Reservoirs – Edition CRC press
Milanovic´ PT (1981) Karst Hydrogeology, vol 434. Water Resources Publications, Littleton
Milanovic´ PT (2004) Water resources engineering in karst. CRC press, Boca Raton
BREZNIC M. (1998) Storage Reservoirs and Deep Wells in Karst Regions – Edition Taylor & Francis - 9054106883, 9789054106883 - 262 pages

Comité français de l'UICN - Les solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France
<https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/agir/espace-documentaire/les-solutions-fondees-sur-la-nature-pour-lutter-contre-les-changements>

Thèses

Daher W (2011) – Étude de faisabilité de recharge artificielle dans un aquifère karstique côtier - Thèse des Universités Montpellier II et St Joseph de Beyrouth -

Thibaut Garin (2018-2022) - Contraindre la recharge, les modalités et structures d'écoulement en contexte carbonaté : Application aux ressources en eau des bassins versants de l'Huveaune et du karst de Port-Miou (Sud-Est de la France) - Thèse de doctorat – Université Aix/Marseille

ARFIB Bruno (2001) Etude des circulations d'eaux souterraines en aquifères karstiques côtiers : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce). Thèse de doctorat de l'Université Paris 6. 343p

Gestion active de l'exsurgence karstique de la source du Lez

- Avias J. -V., 1995. Gestion active de l'exsurgence karstique de la source du Lez, Herault, France, 1957-1994. Hydrogeologie (Orleans) 1995, 113-127
- Borrell-Estupina V., Maréchal J.-C., Coustau M., Fleury P., Jourde H., Kong A Siou L., Ladouche B., Malaterre P.-O., Mazzilli N., Ricci S., 2012. Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Modèles numériques de fonctionnement de l'hydrosystème, Rapport RP-60222-FR, 253 p., 113 fig., 32 tab., 2 ann.
- Collin J. -J., 1994. La gestion active des aquifères. Courants 25, 36-42.
- Ladouche, B., Caballero, Y., Maréchal, J.-C. (2013) Evaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine du système karstique du Lez, Karstologia 62, 57-64.
- Maréchal, J.C., Vestier, A., Jourde, H., B., Dörfliger, N., 2013. L'hydrosystème du Lez : une gestion active pour un karst à enjeux, Karstologia 62, 1-6.
- Maréchal, J.C., Ladouche, B., Batiot-Guilhe, C., Borrell-Estupina, V., Caballero, Y., Cernesson, F., Dörfliger, N., Fleury, P., Jay-Allemand, M., Jourde, H., Leonardi, V., Malaterre, P.O., Seidel, J.L., Vion P.Y., 2014. Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez –Synthèse des résultats et recommandations – Rapport BRGM/RP-61051-FR, 126 p.

Sites Internet

<https://www.karsteau.fr/karst/Accueil.html>

Présentation du projet de recherche DARDENNES 2013-2018

<https://www.karsteau.fr/karst/dardennes.html>

Pour une Hydrologie Régénérative - Régénérer les cycles de l'eau douce par l'aménagement du territoire

<https://hydrologie-regenerative.fr/>

Annexe II : Compte-rendu des entretiens avec les experts

Expert	Enseignements de l'entretien	Bibliographie
<p>Bakalowicz, Michel</p> <p>Ancien chargé de recherches au CNRS, attaché à l'Unité mixte de recherches hydrosciences de l'Université Montpellier. Expert auprès des Nations unies (en 2004)</p> <p>Directeur adjoint du Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement</p>	<p>1°) interventions sur les conduits karstiques lui paraissent trop risqués, avec des effets irréversibles déjà constatés sur les sites testés (effondrement, décolmatage, création d'autres exutoires). Il est souvent impossible de prédire les conséquences</p> <p>2°) intervention sur les bassins versants amont peut être une solution mais elles amènent souvent des bénéfices à la marge de ceux attendus sur le soutien d'étiage.</p> <p>3°) si on doit privilégier une réalimentation artificielle depuis la surface (injection d'eau superficielle par exemple dans le karst), on devra privilégier l'infiltration lente et diffuse afin d'éviter des déstructurations du karst</p> <p>4°) peu d'exemples n'existe réellement en France de stockage du karst à des fins AEP ou soutien aval. Souvent les barrages ont été réalisés pour des problèmes littoraux (recul du biseau salé). Voir les travaux d'ARFIB (exemples Crétois, port Miou, Liban)</p> <p>5°) exemples de gestion active du karst consistant à surpomper en été et attendre la reconstitution des réserves pendant les périodes automnales ou hivernales. Exemple du LEZ et ou de la source de DAMAS</p>	<p>Voir livre de Petar Milanovic, sur les stockages en karst (Serbie)</p> <p>Voir thèse et Article sur la recharge artificielle par Schlumberger Water System</p> <p>Voir thèse de B. ARFIB</p>
<p>ARFIB, Bruno</p> <p>Chercheur au CEREGE, centre de recherche de niveau international en géosciences de l'environnement,</p>	<p>1°) Bruno a très bien étudié le barrage de la source karstique de Dardenne qui alimente la ville de Toulon. Barrage artificiel qui a permis de barrer le karst et de créer un lac superficiel de 1,1 Mm3</p> <p>Relèvement du niveau de 33 m</p> <p>Calage de la recharge / d'un modèle pluie/débit</p> <p>Voir thèse</p> <p>2°) attention aux risques de débouillage du karst</p> <p>3°) l'approche géochimique manque sensiblement</p>	<p>Projet DARDENNE</p> <p>https://www.karsteau.fr/karst/dardennes.html</p> <p>Thèse de Thibault GARIN du CEREGE</p> <p>https://www.karsteau.fr/karst/TheseGarin.html</p>

<p>Laurent CADILHAC Hydrogéologue à l'Agence de l'eau RMC</p>	<p>1°) l'AERMC travaille sur des études visant à conserver l'eau sur les impluviums amont non karstique (projets en Isère notamment) dont le but est de travailler sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les solutions refavorisant l'infiltration <ul style="list-style-type: none"> - L'organisation du drainage - l'augmentation du déficit de la recharge <ul style="list-style-type: none"> - remodelage du paysage - Bénéfices des ES <p>Notion d'Hydrologie régénérative (voir site Internet)</p> <p>2°) pas d'exemple de barrages AEP sur le bassin RMC : voir exemple de la Goul de la Tannerie (Bourg St Andeol 07) avec un rehaussement de 4 m et des sources de l'Ain</p> <p>3°) attention à l'acceptation sociale de ces projets : exemple des projets de barrage sur le système de la Gervanne : opposition locale notamment des pisciculteurs en aval</p> <p>4°) l'aménagement des pertes pour retarder l'infiltration ne semble pas pertinent (évaporation, aménagements délicats et non gérables, acceptation sociale) -Voir exemple des pertes du Doubs</p> <p>5°) faire très attention à ce que le projet ne modifie pas l'état qualitatif de la masse d'eau en aval (remobilisation des micro-polluants, matières en suspension, pesticides...)</p>	<p>Voir fiche SAGE (Valoire/Bière)</p> <p>Sur l'hydrologie régénérative Accueil - Association Pour une Hydrologie Régénérative (hydrologie-regenerative.fr)</p> <p>Voir test pilote par E. GILLI sur le système de COARAZE</p> <p>SFN-ESO : Des solutions fondées sur la nature pour une gestion durable des eaux souterraines? Base documentaire du BRGM</p> <p>Voir actions PGRE SAGE Bievres Liers Valloire (26 et 38) pour l'engagement de la mise au point d'un schéma d'infiltration favorable à la nappe</p>
--	---	---

<p>Nicolas FRISSANT Hydrogéologue au BRGM- responsable de grands projets sénior Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses Unité Nouvelles ressources en eau et économie</p> <p>Jean-Christophe MARECHAL Directeur BRGM - Direction Eau Environnement Processus et Analyse</p>	<p><u>Description du projet LEZ par JC MARECHAL et REX</u></p> <p>1°) principe de surexploitation de la source du LEZ pour combler les besoins en eau de l'agglo de Montpellier en été 2°) cette surexploitation engendre un rabattement important de la source voire son assèchement total. Le pompage permet donc de combler les besoins en eau AEP mais également le débit réservé en aval (220 l/s). L'exploitation est conditionnée par la hauteur de rabattement et une cote NGF à ne pas dépasser 3°) ce principe a été calé sur un modèle prédictif, intégrant les effets du changement climatique. La surveillance du système est assurée par une vingtaine de piézomètres 4°) la différence avec la Touvre est que le BAC de la source du LEZ est très peu impacté par d'autres usages notamment agricoles. 5°) le BRGM travaille sur des notions de recharge maîtrisée notamment sur la BD LISA. Mais le karst est exclu de cette démarche. 6°) peu de barrages existe en France. On peut citer : <ul style="list-style-type: none"> - Barrage de la Verna (64) pour l'hydroélectricité - Barrage de Salle la Source (12) idem - Barrage des Moussidières (66) AEP - Projet de barrage à COARAZE (déjà évoqué avec GILLI) - Tentative de barrage en Croatie qui a été une expérience douloureuse (car mise en charge importante et dégâts) 7°) REX : bien intégrer les aspects sociologiques dans ces projets</p>	<p style="text-align: center;">Voir Fichier envoyé « Sélection des principales publications et livres sur la mise en œuvre de barrage souterrain dans des karsts. »</p>
<p>Bruno DE GRISSAC Hydrogéologue et directeur du SMEGREG</p>	<p>Réhausse des exutoires : l'avantage est qu'il a déjà été observé naturellement (herbiers) – L'impact sur les exploitations en aval est à évaluer précisément si possible. Pour un système de gestion active (surpompage estival) : l'abaissement du plan d'eau sous le niveau de l'exutoire fait entrer dans une zone à risque (historique du Lez à documenter)</p>	

<p>Michel SEGUIN Ancien responsable du bureau d'études HYDROINVEST Plongeur spéléologue</p>	<p>Un bloc aurait été dynamité en 2005 sur l'émergence principale (Bouillant), provoquant l'effet inverse (documentation personnelle). Il propose de d'abord rétablir la situation d'avant 2005 avant de faire plus (remettre un bloc béton par exemple). Le volume stocké dans le système est tellement grand qu'il faudra un volume conséquent pour avoir un gain. Pour lui, il est plus simple de stocker dans les vides du karst que dans les zones latérales. Une expérimentation avec un test de pompage paraît indispensable (sur le drain ou sur les réserves latérales). Mais le débit devra être très important pour percevoir quelque chose. Les surcreusements (action inverse de la rehausse) sur le lit de la Touvre auraient participé à une hausse de la vidange du système (MS)</p>	<p style="text-align: center;">Voir PPT Etude critique du projet Diguettes M.Seguin 9/2023 Version 02/2024</p>
<p>Marc LAMBERT - Michaël GOUJON Hydrogéologues - Charente EAU</p>	<p>Discussion sur le fonctionnement de la Touvre Peu de REX sur le sujet</p>	<p style="text-align: center;">Données statistiques à récupérer de Marc LAMBERT</p>
<p>Laurent DANNEVILLE Hydrogéologues</p>	<p>Discussion sur la notion de réserve (volume dynamique) Exemple de la Sorgues (barrage EDF) qui a sauté à la première crue importante. REX de la galerie minière du Travers Bancs à St George de Luzençon et de la galerie d'Alban (stockage AEP dans des anciens conduits miniers) Impact difficile à estimer mais sans doute l'impact le plus fort étant l'apparition de trop-plein en amont des sources. L'idée serait de pomper dans des réserves annexes afin de ne pas solliciter le flux en étiage Aménagement des pertes (REX du Trou du Souci) mais souvent très conflictuel – Voir REX du lac des Rives (barrage d'une perte)</p>	<p style="text-align: center;">Fiche sur le lac des Rives (LARZAC) Article sur le Trou du Souci Photos de la Sorgue</p>

Annexe III : Compte-rendu des entretiens avec les acteurs du territoire

Annexe IV : Etude de la solution visant à piloter la vidange par l'aval

Annexe V : Etude technique de la solution de surélévation du fil d'eau à l'aval des sources de la Touvre

Données utilisées

Les documents exploités pour la présente étude de faisabilité sont :

- Atlas hydromorphologique. SEG juin 2008
- Fiche de site de la station hydrométrique du Bouillant. Hydro-Invest pour la CA Grand Angoulême
- Suivi des fluctuations du niveau piézométrique du Bouillant – Touvre. Hydro-Invest pour la CA Grand Angoulême.
- Etude critique du projet Diguettes. M. Seguin. Février 2024
- DUP périmètre de protection du captage (arrêté n°16-2022-03-09-00005)

Visite de site

Une visite de site a été effectuée le 11 septembre 2024 afin d'apprécier les conditions d'accès, la nature du substrat, les enjeux liés à une rehausse du plan d'eau, la capacité des berges à accueillir une infrastructure (voir pages suivantes).

Les conditions météorologiques étaient pluvieuses avec un débit soutenu de l'ensemble sourcier de 10,54m³/s (mesuré à la station de Gond Pontouvre) qui correspondait à un débit caractéristique de QMM5 humide. Le site de Font Lussac était notoirement végétalisé.

Définition des besoins et contraintes liés aux sites d'urgence

La définition des besoins et des contraintes est détaillée dans le tableau suivant, en fonction des 8 critères suivants :



- Comptabilité avec la présence d'un captage AEP et les usages en aval
- Réversibilité du dispositif
- Efficacité de la solution
- Impact sur le paysage/visibilité
- Protection de l'Environnement
- Technique, accès et foncier

Les volets réversibilité, intervention dans le périmètre de protection immédiate (PPI) du captage et réduction des impacts environnementaux, nous conduisent à proposer :

- **Un pilote** à moindre coût, réglable / modifiable, démontable, permettant de tester la réponse du système karstique sur quelques cycles hydrologiques. A ce stade, une solution pérenne ou mixte (type fondation pérenne supportant une superstructure amovible) n'est pas envisageable et satisfaisante.
- **Un dispositif non fondé**, ce qui implique une surface de contact importante, ce qui va à l'encontre de l'engagement à minimiser l'impact environnemental.
- Le mode d'intervention devant limiter l'utilisation d'engins en bordure et dans le lit, implique que **les matériaux de construction du seuil doivent être manœuvrables à la force humaine.**

Planche photographique 1

Accès commun

	
<p style="text-align: center;">Vue vers l'accès commun aux 2 sites</p>	<p style="text-align: center;">Vue dos au site Lussac de l'accès commun</p>

Site de Font Lussac





	
<p style="text-align: center;">Accès berge rive droite</p>	<p style="text-align: center;">traversée</p>
	
<p style="text-align: center;">Substrat et plante aquatique</p>	<p style="text-align: center;">Traversée</p>

Planche photographique 2

Site du Bouillant et du Dormant





	
<p>Résurgence et traversée depuis la rive droite. La conduite AEP est visible</p>	<p>Substrat sablo graveleux libre sur faible épaisseur (5cm) et marne friable</p>
	
<p>Résurgence et traversée depuis la rive gauche</p>	<p>Accès sentier amont dans le périmètre de protection rapproché</p>

Tableau 1 : Besoins et contraintes détaillés du projet de diguette

Volet	Besoins / contraintes	Traduction technique
Compatibilité avec la présence d'un captage AEP	L'intervention s'opère dans un enjeu sanitaire fort. La circulation d'engins motorisés et l'intervention de personnes dans l'eau est strictement règlementée dans le PPI du captage	L'intervention dans le PPI requiert des mesures de prévention et protection contre l'intrusion de polluants, pour ne générer qu'un risque marginal de pollution sanitaire.
Réversibilité	Le risque que le volume de stockage soit insuffisant pour assurer les objectifs du projet (soutien d'étiage de la Charente par déstockage du karst) ou que des réponses inappropriées du système surviennent est réel. En cas d'insatisfaction du projet « Diguette », les mesures constructives doivent pouvoir être démontées pour un retour à l'état actuel. L'impact environnemental doit être minimal.	2 stratégies : <ul style="list-style-type: none"> - Le projet se décline en 2 phases : un pilote porté par une diguette amovible sur plusieurs cycles hydrologiques. Si l'essai est concluant une diguette pérenne pourrait être mise en œuvre dans un second temps, sinon elle sera retirée - Le projet se déploie progressivement avec une embase pérenne sur laquelle une structure amovible repose
Performance	Rehausse du plan d'eau de 0.5m afin de limiter la PHE à 1m. Si l'on s'affranchit de cette contrainte, à l'extrême, une rehausse d'au plus 1.5m pourrait être envisagée dans la mesure où cela correspond au marnage naturel.	Le seuil doit pouvoir contenir un niveau du plan d'eau maîtrisé, mais qui puisse évoluer au cours du pilote et en phase de remplissage.
	Le niveau du plan d'eau (déterminant le stock) et les débits traversant le seuil (déterminant les usages et besoins environnementaux aval) doivent être maîtrisés et pilotables	Pilotage des débits (satisfaire les besoins) et du niveau (remplissage du volume retenu, gestion des inondations) par le seul pilotage des débits en gravitaire (limitation de l'empreinte environnementale) Avec le jeu des vases communiquant, un seul organe de pilotage peut être mis en place
	La rehausse du plan d'eau est simultanée entre les deux secteurs pour éviter une modification substantielle des répartitions d'écoulement	
	Les crues se caractérisent par des débits cumulés aux 3 résurgences de 30 à 40m ³ /s, a priori réparti en ¾ coté Dormant Bouillant et ¼ Font Lussac dans ces gammes de débit	La diguette ne doit pas provoquer de risque induit sur les usages en aval et assumer une certaine incertitude sur la répartition des flux entre les 4 résurgences pendant une crue
L'absence d'enjeux anthropiques en berge du plan d'eau rehaussé. Cependant Hydro Invest propose de limiter la cote maximale de la surface libre au Bouillant à 47.5mNGF au site Bouillant Dormant	Les impacts d'une rehausse de la nappe d'accompagnement et des gradients hydrauliques sur la stabilité des berges doit être appréhendé par ailleurs. Toutefois en stade préliminaire, nous resterons sur une rehausse de 0.5 à 1m.	
Paysage	Le site présente un caractère architectural reconnu qu'il convient de respecter	Autant que possible les mesures seront discrètes, respectueuses des matériaux (pierres maçonnées de berges) et du cadre naturel
Environnement	Le seuil constitue un obstacle potentiel à la montaison d'espèces de première catégorie piscicole	La continuité hydraulique amont aval doit être assurée pour ces espèces selon la classe d'âge à préciser

Volet	Besoins / contraintes	Traduction technique
	L'implantation du seuil repose sur un substrat abritant potentiellement des frayères	Selon la présence effective de frayère, la position du seuil doit être la plus en amont pour limiter l'emprise de frayère potentielle où les vitesses sont réduites et l'emprise du seuil la plus réduite
	Le substrat peut être colonisé par des végétaux aquatiques (habitat). Il contient une proportion de fines propices à la libération de matières en suspension (MES).	L'enlèvement de ces végétaux doit être limité au strict nécessaire. La rehausse du plan d'eau en amont sur les végétaux constitue une modification de leur milieu. Le caractère dommageable pour le milieu devra être défini par ailleurs (mais indépendant de la solution de rehausse du plan d'eau) Le chantier prévoit une interception des MES
	La ripisylve est relativement dense mais offre des trouées permettant l'accès par des petits engins sans débroussaillage important ni coupe d'arbres.	En phase pilote, l'abattage est proscrit.
Technique	Le substrat des 2 sites est composé d'une relative fine couche de sédiments (nu à quelques décimètres) sur un socle marneux plutôt tendre pour le coté Bouillant et sur un calcaire plus induré coté Font de Lussac.	Les propriétés géotechniques du socle marneux sont compatibles mais pas de grande qualité avec l'implantation d'un seuil monobloc requérant un ancrage. Afin de limiter l'affouillement en pied du seuil, la dissipation d'énergie de chute s'opère dans la masse d'eau et sur le seuil, et les solutions limitant les temps et l'intensité de surverse sont privilégiées
	Le profil en long du seuil est assez régulier coté Font de Lussac. Il présente des ravines et un chenal de 0.5 à 1.5m de variation d'altitude par rapport à un plan d'eau fixe. A noter que le chenal coté Bouillant est positionné proche de la rive difficile d'accès.	Le seuil assurera un colmatage efficace au contact substrat malgré ces irrégularités. Le maintien du substrat, du couvert végétal doit être traité selon le volet réversibilité et impact environnemental
	Les berges sur lesquelles le seuil s'ancrera seront naturelles avec la présence de grands arbres et racines à proximité. Une des berges (rive gauche de font Lussac) est un mur maçonné	L'ancrage en berge doit limiter voire éviter le décaissement et profilage par enlèvement de matériaux
Accès	L'accès au seuil en phase travaux et exploitation est possible par des engins motorisés sur 1 seule des 2 berges de chaque site. Une mise à l'eau de moyens légers semble possible, mais la mise à l'eau d'une barge requiert un débroussaillage.	Cette contrainte intervient sur le phasage des travaux, l'amenée des matériaux et les moyens terrestres ou flottants à mettre en œuvre
Foncier	La gestion foncière des accès et de l'aménagement ne fait pas l'objet de la présente analyse. Ce point ne présente pas une limite rédhibitoire.	A priori, l'ensemble du PPI est propriété du Grand Angoulême

- L'accessibilité engin de chaque seuil par une seule rive limite fortement la capacité d'intervention via une pelle long bras. Celle-ci ne peut être envisagée à des coûts proportionnés que sur 10 à 20m.
- L'aménagement de pistes provisoires n'est pas approprié au milieu, cependant des solutions flottantes sont envisageables si le tirant d'eau le permet et dans la mesure où le risque de pollution est marginal

Mise en œuvre d'un pilote

Nous distinguons trois éléments complémentaires composant le système :

- Le seuil permettant de tenir la charge hydraulique avec un niveau de plan d'eau maîtrisé ;
- Deux éléments modulaires :
 - L'organe assurant la continuité écologique aval (le cours de la Touvre) et amont (la retenue) ;
 - L'organe assurant le pilotage niveau d'eau par le pilotage du débit.

Les deux organes modulaires peuvent être techniquement vus comme des « options » qu'il est possible d'ajouter ou non au seuil. Le caractère « optionnel » ou obligatoire de ces 2 modules dépend de la réglementation et des performances attendues.

La période de mise en œuvre correspond à l'étiage (octobre – novembre) pour :

- Faciliter la mise œuvre à des niveaux bas, voire d'assec
- Limiter l'impact sur la végétation au début du cycle végétatif de la flore
- En début du cycle hydrologique de remplissage du réservoir par les pluies hivernales et printanières

Moyens de mise œuvre du pilote

Les matériaux de construction peuvent être amenés sur site par des engins motorisés légers sur une berge. Leur préparation est réalisée sur un espace protégé contre la pollution (surfaces bâchées et récupération / traitement des eaux, déportation des stocks de carburants et autres pollutions potentielles...). La mise en œuvre des matériaux peut être envisagée selon différents modes.

Critère	Force humaine depuis la berge	Pelle long bras	Flotteur / treuil	Brouette électrique autoportée
Milieu	A sec / en eau	A sec / en eau	En eau	A sec
Limite technique	<15kg / <10kg	Env. 12m pour une pelle 26t	Qques centaines de kilos Barge : 35m ² / 16t	Qques centaines de kilos
Risque/incidence environnemental	Très faible	Risque limité maîtrisable	Très faible en rivière, mais significatif en berge	Risque limité
Coût relatif	Modéré	Modéré	Modéré à important	Modéré

Tableau 2 : Appréciation des moyens de mise en œuvre

Selon la solution technique engageant des éléments plus ou moins lourds, il existe des moyens à risque environnemental acceptable pour opérer sur toute la largeur des seuils. Cependant, des éléments de quelques centaines de kilos intransportables en mini-bumper ou brouette autotractée électrique ne peuvent être transportés sur toute la largeur sans engager un coût et des moyens importants (treuil, barge).

Franchissement piscicole, continuité hydraulique et sédimentaire

Afin de faciliter la continuité hydraulique et sédimentaire entre la Touvre en amont et aval des seuils, deux alternatives de franchissement des seuils sont envisageables.

- Le débit réservé transite par une surverse aménagée permettant le franchissement d'espèces sauteuses. L'échancrure dans le seuil concentre le débit réservé et l'aménagement de la chute en coursier de cette échancrure permet l'appel et le franchissement par marches successives ou rampe.
- Un assemblage de module préfabriqués portant des bassins fendus pourront être mis en œuvre permettant le franchissement d'espèces sauteuses et nageuses (ou pour les juvéniles). Le seuil surverse pour les hautes eaux et crues.

Ces deux alternatives par-dessus engagent des éléments relativement lourds (plusieurs dizaines à quelques centaines de kilos), mais elles peuvent être implantés à proximité de la berge accessible (mise en œuvre par une pelle long bras par exemple) sur chacun des deux sites. Elles discriminent les espèces dans la mesure où l'accessibilité amont est limitée à impossible pour les espèces nageuses et juvéniles.

Une alternative par en dessous peut être implantée dans le chenal d'étiage du site Bouillant et sans contraintes sur le site de Font Lussac. Elle consiste à recouvrir par le seuil une ou plusieurs conduites/cadres posés au fond. Cette solution engage la pose d'éléments de quelques dizaines à une centaine de kilos. Ces éléments doivent être posés dans le chenal d'étiage proche de la rive droite du site de Bouillant.

La conception, fabrication et pose de modules préfabriqués de bassins à fente pour une chute aménagée de 0.5m travaillant dans la gamme $0.2 - 0.5\text{m}^3/\text{s}$ peut être estimé à environ 20-30k€. La pose d'un conduit en fond dimensionné au débit réservé peut être estimé à quelques k€.

Pilotage du niveau de la retenue

Le niveau de la retenue en amont des seuils est le produit des flux entrant et sortant ainsi que de la configuration des aménagements (arase de seuil).

- Les flux sortants sont portés par le débit réservé et les besoins des avaliers.
- Les flux entrants sont naturels (non pilotables)
- La performance est définie par le maintien d'un niveau du plan d'eau maîtrisé (à +0.5m dans un premier temps)

Trois stratégies de gestion du niveau du plan d'eau sont envisageables :

Gestion	Modalité	Intérêt et limite
Passive non pilotée - surverse	Le débit entrant et sortant s'équilibre par surverse uniquement	Le niveau de la retenue est maintenu autour de la cote d'arase de la surverse
Passive non pilotée – surverse et conduit	Le débit entrant et sortant s'équilibrent par surverse et un orifice de fond	Le niveau de la retenue est maintenu autour de la cote d'arase de la surverse sauf en étiage où la retenue vidange plus vite que l'apport
Passive/active pilotée – vannage et surverse de sécurité	Le débit sortant est contrôlé par un vannage automatisé (vanne à flotteur -type AMIL®- ou commandée)	Le seuil n'est plus surversant que pour des épisodes de crue, le niveau est maintenu par la gestion du flux sortant

Tableau 3 : Stratégies de pilotage des niveaux

La mise en œuvre de conduits et plus encore de vannage implique la manipulation d'éléments lourds (plusieurs dizaines à la centaine de kilos). Ces éléments doivent être disposés dans le chenal d'étiage du site Bouillant, loin de la rive gauche.

L'absence de pilotage péjore l'intérêt de constituer une réserve mobilisable en gestion saisonnière (libération peu maîtrisée du stock sur la saison sèche) et sur les usages journaliers (ajuster le débit de sortie modulé par les besoins en eaux brutes AEP).

La gestion passive par surverse présente un obstacle à la continuité piscicole pouvant être palliée par l'aménagement d'un module « passe à poisson », ce qui annulerait l'intérêt d'éviter de manipuler des éléments lourds sur un secteur moins accessible.

La gestion pilotée par un vannage automatisé est compatible avec la continuité piscicole. La difficulté consiste à placer le module composé d'éléments lourds sur le chenal rive droite du site Bouillant. La vanne à flotteur est entièrement mécanique, elle a un encombrement important. Les pièces mécaniques sont graissées aux axes, ce qui porte un risque sanitaire. La vanne commandée implique la gestion d'un moteur qui peut être déporté moyennant des conduits hydrauliques. Les pièces mécaniques graissées et le circuit hydraulique portent un risque sanitaire

Une solution active par pompage ne paraît pas réaliste au vu des volumes à faire transiter.

Une solution active par enclenchement de siphons inversés est techniquement possible, cependant la différence de niveau impose un grand nombre de siphons de faible capacité. D'autre part les siphons tendent à fonctionner en « tout ou rien » ce qui n'est pas compatible avec une gestion maîtrisée du plan d'eau.

La fourniture et pose d'une unité de pilotage peut être évaluée à 15 – 25 k€ pour le transit d'un débit de l'ordre d'1m³/s.

Solution technique du seuil du pilote

Solution A de type seuil poids

Il s'agit de la solution inspirée de celle proposée par Hydro-Invest dans son projet de 2009.

Tableau 4 : Phasage sommaire seuil poids

Phase	tâche	objet
0	Installation de chantier	Protection de l'emprise chantier vis-à-vis de la circulation d'engins Lavage en carrière des matériaux et mise en sacs de 15kg Travail à sec (sauf chenal d'étiage) ou en eau à partir d'une barge à fond plat Préparation d'une déviation provisoire pour mise à sec du chenal d'étiage
1	Décapage et pose d'une bêche	Pose en 2 passes : <ul style="list-style-type: none"> ● Équipement du chenal + conduite débit réservé ● Bascule sur les linéaires à sec
2	Montage du seuil	
3	Fermeture du seuil	
	Compléments	Etude de stabilité (notamment au glissement) d'un seuil poids soumis à une aspiration du ressaut aval + poussée statique amont sur une bêche lisse Gestion du ressaut hydraulique

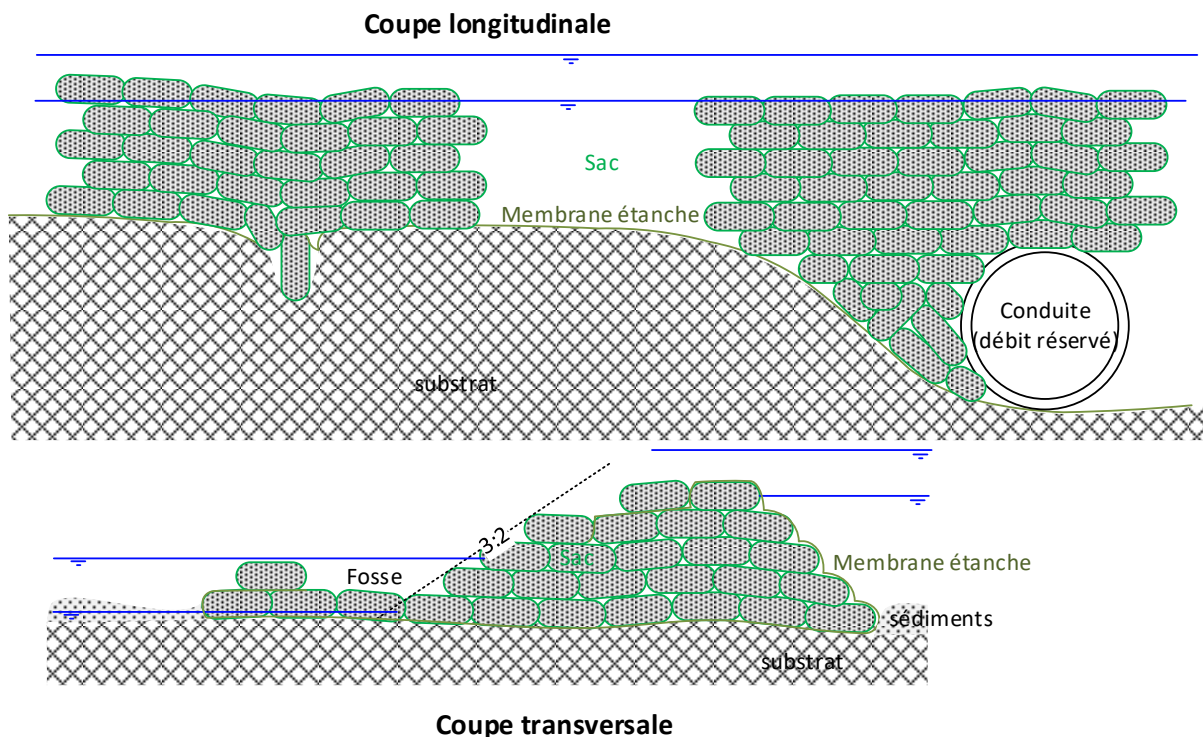


Figure 1 : Coupes type du seuil en mur poids

La mise en œuvre est possible par manutention simple, elle peut être appuyée par une barge à fond plat ou des brouettes électriques.

Le coût estimatif d'un tel seuil est évalué entre 900 et 1 100€ par mètre linéaire (ml) compte tenu du traitement des matériaux et des difficultés de pose.

Le démontage des diguettes peut être estimée à environ 300-350€/ml selon la mise en décharge des sacs.

Solution B de type barrière amovible

Cette solution est issue de techniques de mise à sec lors de chantier et de protection contre les inondations. Seules les solutions s'adaptant sur un fond irrégulier sont citées. Les barrières amovibles souples peuvent être :

- des boudins gonflables à l'eau,
- des barrières souples autoportantes.

Les boudins gonflables à l'eau sont écartés car ils menacent de déjauger à la surverse.

L'emploi le plus courant est une solution de type WaterGate© (MegaSecure).

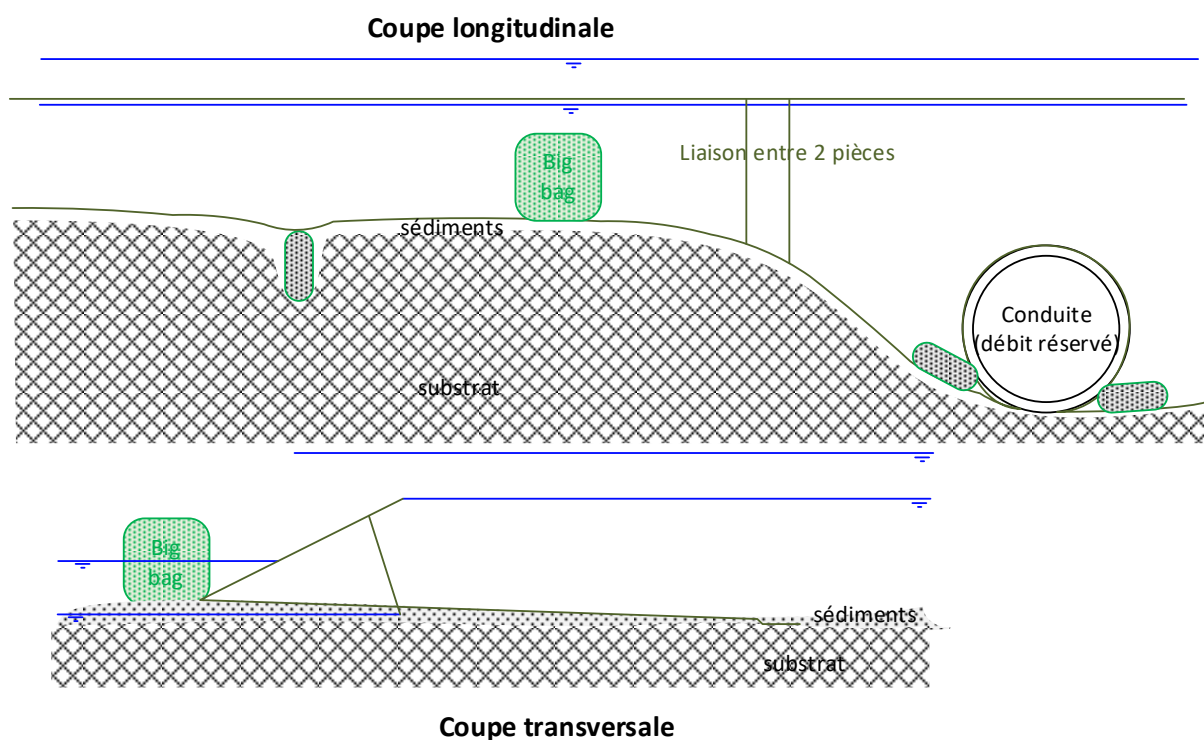


Figure 2 : Coupes type du seuil avec barrière souple amovible

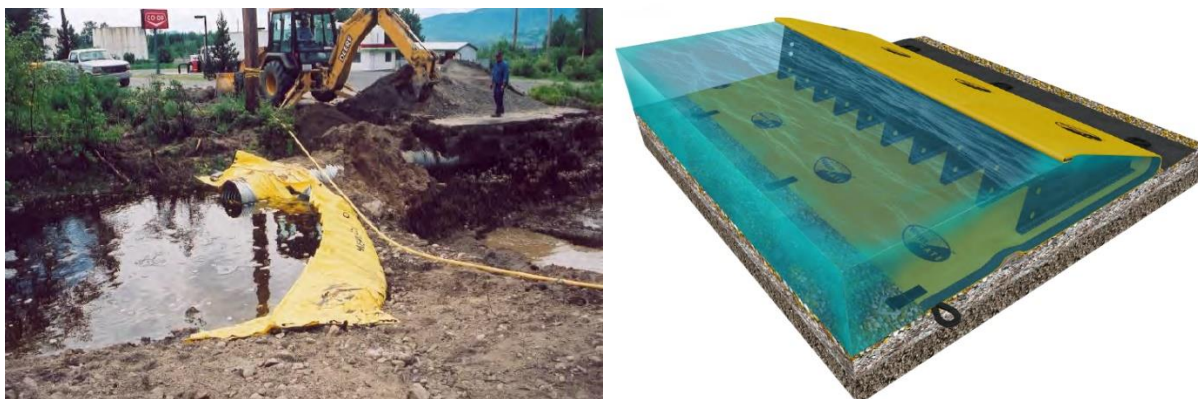


Figure 3 : Illustration d'une barrière amovible (crédit : WaterGate© - MegaSecure)

Sur un linéaire aussi important et vis-à-vis de la surverse, il est préférable d'appuyer les barrières sur des lests en pied aval (big bags) posé tous les 7m environ.

Tableau 5 : Phasage sommaire seuil souple amovible

Phase	tâche	objet
0	Installation de chantier	Protection de l'emprise chantier vis-à-vis de la circulation d'engins Lavage en carrière des matériaux et mise en sacs de 15kg (big bags) Travail en eau
	1	Pose de la barrière en eau
2	Consolidation par big bags et enterrement partiel de la jupe	
3	Fermeture du seuil	
	Compléments	Gestion du ressaut hydraulique

Le montant de ce dispositif est estimé entre 900 et 1100€ par mètre linéaire (ml) en considérant l'achat des barrières (l'alternative à la location n'est pas rentable sur une durée de pilote sur plusieurs années). A noter que les bâches peuvent être commandées avec des coloris plus intégrés (vert) au paysage.

Le démantèlement du seuil est estimé à 5k€ avec la possibilité de réaffecter les barrières aux chantiers ou à la protection contre les crues.

Autres alternatives

Des alternatives plus « construites » sont techniquement réalistes et potentiellement moins coûteuses, mais elles imposent de niveler (en déblai ou remblai) le substrat pour poser les éléments, ce qui leur confèrent un caractère partiellement irréversible.

Une solution amovible de ce type aurait pu être la pose de tronçons de tuyau ciment par tronçon transportable (barge ou mini-bumper) fermant une bâche étanche.

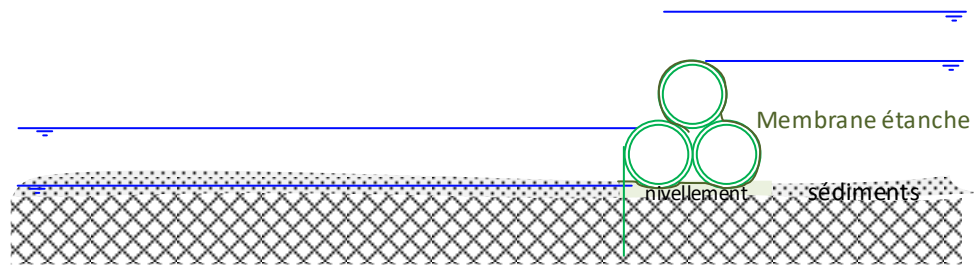


Figure 4 : Coupe d'une solution semi-construite

Annexe VI : Etude technique de la solution d'obturation des conduits karstiques

Données utilisées

Les documents exploités pour la présente étude de faisabilité sont :

- Atlas hydromorphologique. SEG juin 2008
- Suivi des fluctuations du niveau piézométrique du Bouillant – Touvre. Hydro-Invest pour la CA Grand Angoulême.
- Projet rétroaction. M. Seguin. 2023
- DUP périmètre de protection du captage (arrêté n°16-2022-03-09-00005)

Définition des besoins et contraintes liés aux sites d'émergence

La définition des besoins et des contraintes de la solution a été étudiée en fonction des critères suivants :

- Comptabilité avec la présence d'un captage AEP
- Réversibilité du dispositif
- Efficacité de la solution
- Protection de l'Environnement
- Technique, accès et foncier

Comme pour la solution diguette, les volets réversibilité et intervention dans le PPI du captage nous conduisent à proposer :

- **La mise en œuvre d'une phase préalable** permettant de mieux quantifier les échanges entre les deux ensembles sourciers (Font de Lussac et l'ensemble Dormant/Bouillant) afin de consolider l'approche de M. SEGUIN.
- **La mise en place d'un pilote réglable et démontable**, permettant de tester la réponse du système karstique à une réduction de section.
- Le test impliquera obligatoirement **une modulation de la section**, c'est-à-dire qu'on diminuera progressivement la section tout en mesurant l'effet progressif de cette réduction sur la charge hydraulique dans les émergences ainsi que sur le débit des sources. La modulation devra se faire obligatoirement sur les deux émergences (Font de Lussac et Bouillant).
- **Le mode d'intervention devra limiter l'impact sanitaire** sur le captage en eau potable. Il nécessitera l'intervention de scaphandriers habilités en travaux subaquatiques.

A ce stade, une solution pérenne et massive (dépose d'un gros bloc d'obturation partielle de la section) telle que proposée par M. SEGUIN, n'est pas envisageable et pourrait engendrer des impacts irréversibles et non quantifiables. Cette solution nous paraît dangereuse car :

- **Les travaux devant se faire en conditions de sécurité optimales** (travaux subaquatiques encadrés par la législation hyperbares), le transport et la pose d'un bloc de plusieurs tonnes sont délicats et pourraient s'avérer dangereux en cas de mauvaise manipulation et d'obstruction totale du conduit.
- Comme indiqué, nous pensons que **le test de réduction d'une section doit se faire par paliers progressifs** afin de quantifier l'effet sur les paramètres régissant les émergences. L'installation d'une solution définitive et massive pourrait avoir des effets non prévisibles.

Phase préalable

A ce stade et selon les experts d'ANTEA, il manque sur le site d'émergence, des connaissances précises du fonctionnement hydrogéologique permettant de quantifier les échanges entre les deux ensembles sourciers.

Il est important de noter que toute réduction de section va s'accompagner obligatoirement d'une diminution des débits aux émergences et donc d'une modification des échanges (via une loi de pertes de charges) entre les deux sites Bouillant/Dormant d'un côté et Font de Lussac de l'autre.

Une réduction non contrôlée de la section au Bouillant pourrait engendrer une augmentation du débit à Font de Lussac et inversement.

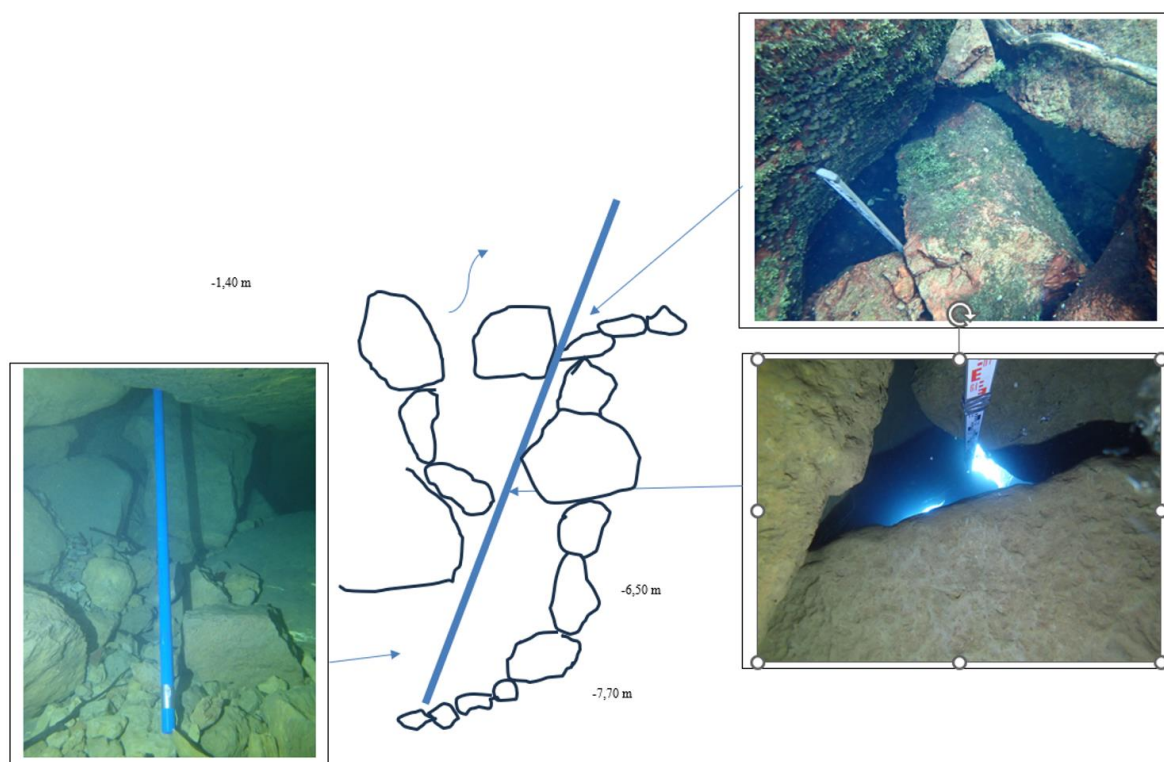
Comme l'a mentionné M. SEGUIN, l'idée de cette solution est de rétablir les sections d'origine des émergences afin de diminuer la vitesse de vidange du système. L'idée est de revenir aux conditions naturelles d'émergences des années 1970. Cette solution reste la plus efficace en termes de stockage/déstockage puisqu'elle permet d'augmenter les pertes de charge et ainsi de réduire le débit d'émergence.

Afin de mieux comprendre les variations de charges entre les deux sources et de quantifier les impacts potentiels, nous recommandons une instrumentation de l'ensemble sourcier sur 1 cycle hydrologique. Cette phase permettra également de cartographier précisément le site par des relevés topographiques précis ainsi que les émergences noyées. En effet, à ce stade, aucun document topographique récent et précis ne permet d'établir un état des lieux des sections où la solution de réduction pourrait être envisagée.

Cette phase préalable comprendra :

- **L'instrumentation de la source Font de Lussac** à travers l'installation d'une station hydrologique sur l'émergence ;
- **L'instrumentation par des capteurs de pression installés au fond des émergences** par des plongeurs spécialisés. Ces capteurs permettront de mesurer les variations de charges hydrauliques (différentiels de pression) lors de conditions hydrologiques différentes et de confirmer les différences de pertes de charges calculées par M. SEGUIN. Les données devront être télétransmises.
- Lors de la pose des capteurs, **une reconnaissance subaquatique** accompagné d'un **relevé topographique** des résurgences devra être effectuée avec établissement de coupes et profils précis (centimétrique) en travers permettant de cerner la morphologie des sections qui pourraient faire l'objet d'un pilote. Ce relevé devra s'accompagner d'un reportage photographique permettant de visualiser correctement les sections concernées (voir figure 15).
- **Le relevé topographique et altimétrique de surface** de l'ensemble sourcier avec établissement de cote altimétrique très précise de points de repères ;
- **La faisabilité de compléter le réseau de suivi par un piézomètre proche des émergences** (à 100-150 m) et permettant de quantifier les pertes de charges dans le karst.
- **Le suivi de l'ensemble du monitoring** avec des campagnes de jaugeages mensuels (Font de Lussac, Echelle et Lèche au Pontil, Bouillant-Dormant).
- **L'établissement d'un rapport d'interprétation des données et d'un Avant-Projet de travaux.**

Figure 1 : Exemple de relevé de section subaquatique avec relevés photographiques (source ANTEA)



Mise en place d'un pilote

Il existe actuellement deux solutions techniques qui pourraient répondre aux contraintes énoncées ci-avant :

- Une solution complexe à l'aide de ballons obturateurs (type packs) modulables à l'air ;
- Une solution par mise en place d'un coffrage supportant des éléments de réduction malléables.

La première solution dite complexe consisterait à poser au droit des sections des ballons obturateurs gonflables et modulables à distance. Un dispositif de ce type est utilisé pour bloquer temporairement le flux d'eau dans une canalisation. Il existe deux types principaux : ceux avec by-pass, qui permettent un certain flux d'eau à travers le ballon, et ceux sans by-pass, qui bloquent complètement le flux. Ces obturateurs gonflables disposent d'une tubulure de gonflage relié à un compresseur qui en régule et en maintient la pression. Le tout est piloté à distance via un terminal de pilotage.

Les avantages de ces solutions sont les suivants :

- Ils sont composés de matériaux souples adaptés en épaisseur et résistance, à la gamme de diamètres des sections ;
- leur conception et leur fabrication peut se faire sur-mesure, autorisant toute forme telle qu'ovoïde,
- leur gonflage peut se faire de façon modulable et à petite vitesse,

- il s'agit de dispositifs pneumatiques, permettant une remise en place, sans gaspillage d'air, ni intervention manuelle, quelle que soit la dimension.

Figure 2 : Photographie d'obturateurs de canalisations



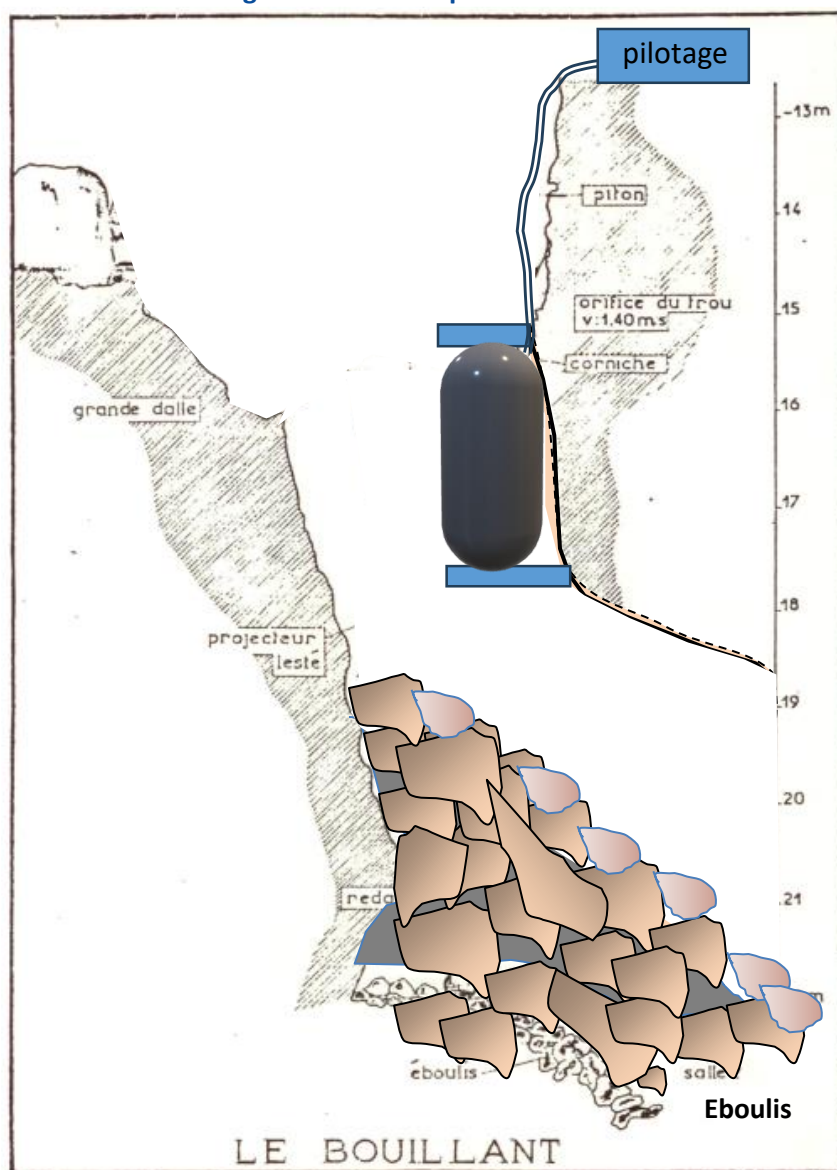
Le phasage proposé pourrait être le suivant :

Tableau 1 : Phasage sommaire de la solution d'obturation

Phase	tâche	objet
0	Préparation du chantier	A partir de la phase préalable de reconnaissance, confection sur mesure des ballons obturateurs à la section voulue Validation de l'AVP Soumission de l'AVP aux services de l'Etat. Avis d'un hydrogéologue agréé Consultation d'un maître d'œuvre Etablissement d'un protocole d'expérimentation et de suivi soumis aux services de l'Etat et au comité d'experts
1	Installation de chantier	Etablissement des documents EXE par l'entreprise. Validation Protection de l'emprise chantier, balisage Préparation des travaux subaquatiques
2	Préparation de la pose des obturateurs	Butonnage de la section choisie par mise en place d'étais permettant de fixer et soutenir les obturateurs
3	Descente des obturateurs	Descente et mise en place des obturateurs.
4	Tests	Test de gonflage selon le protocole choisi Suivi piézométrique et du débit des points d'eau avec jaugeage hebdomadaire des émergences

Les travaux seront réalisés en respectant la législation hyperbare ainsi que les pratiques définies par les commissions plongées souterraine des fédérations FFESSM et FFS. L'équipe sera constituée de trois spéléologues plongeurs chevronnés, scaphandriers classe 2A et B, pratiquant cette discipline sur des développements et des profondeurs supérieurs à ceux imposés par cette opération.

Figure 3 : Solution par obturateur

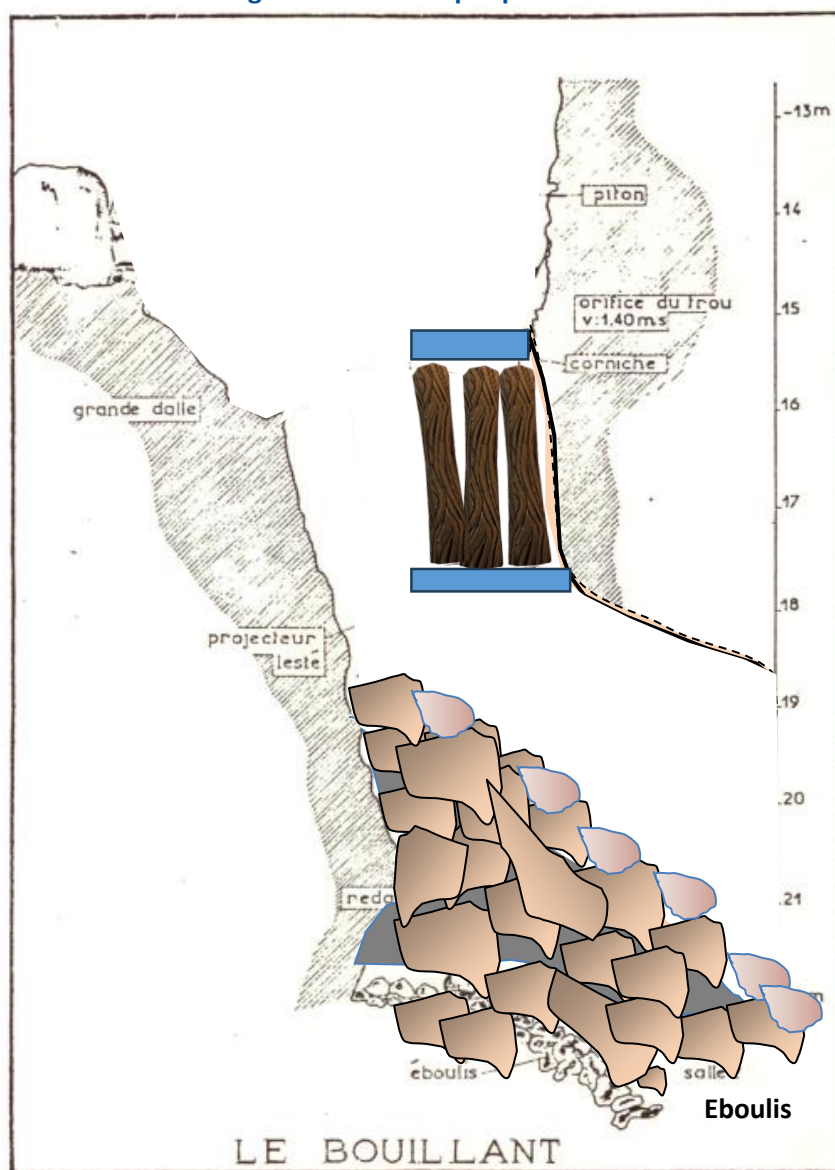


L'autre solution dite simple consisterait à remplacer les ballons obturateurs par des poutrelles en matériaux sélectionnés (résine, INOX, béton) que l'on viendra assembler et encaster dans un boutonage prévu à cet effet.

Cette solution, probablement plus adaptée aux contraintes de terrain, présente les avantages suivants :

- Solution plus simple, plus solide et plus facile à manœuvrer ;
- Solution plus économique ;
- Dispositif plus adapté aux vibrations et aux frottements dans le conduit karstique.

Figure 4 : Solution par poutrelles



Difficultés d'installation

Un entretien téléphonique a été réalisé avec l'un des plongeurs des sources de la Touvre afin de connaître les conditions d'accès aux conduits karstiques noyés. Ce plongeur nous reporte les éléments suivants :

- Les conditions de plongées sont assez difficiles et nécessitent des spéléologues plongeurs chevronnés, habilités en classe 2A et B ;
- La problématique provient essentiellement du puissant courant qui circule dans les conduits karstiques et qui rend toute stabilisation difficile voire impossible. Ce courant est accentué par l'étroitesse des zones d'entrée qui rend l'accès en plongée souvent impossible, seulement lors d'étiages très prononcés.
- L'autre paramètre contraignant reste la turbidité de l'eau qui peut rendre difficile la progression sous l'eau.



Figure 4 : Topographie de la source de Font de Lussac (source Jean-Pierre Stéfanato)

Le plan des sources reporté sur le cadastre.

Avec le trajet approximatif de la galerie d'alimentation du Bouillant (ou d'une des galeries d'alimentation ?)

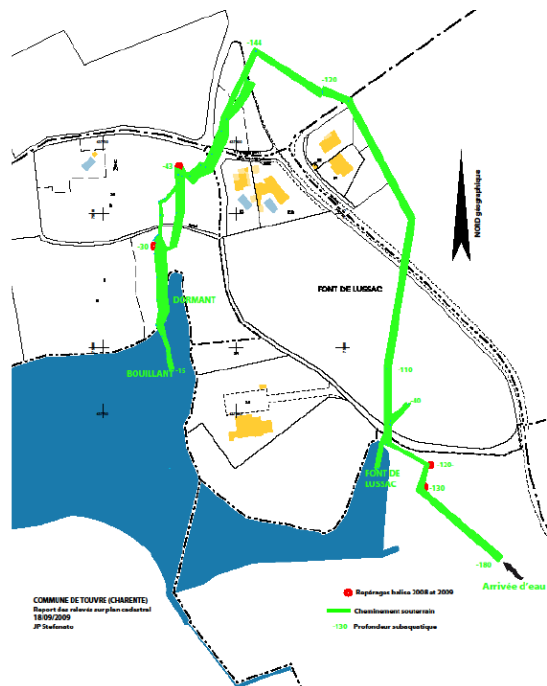


Figure 5 : Report approximatif des galeries du Bouillant et de Font de Lussac

Annexe VII : Etude de la gestion des apports depuis le domaine granitique

Le changement climatique n'implique pas seulement un monde plus chaud, il annonce un monde qui change.



Notre métier, vous accompagner pour gérer ces enjeux.



Siège social : ZAC du Moulin, 803 Boulevard Duhamel du Monceau, CS 30602, 45166 OLIVET CEDEX –
Antea France – SAS au capital de 4 700 000 € - SIREN 393 206 735 – Code APE 7112 B

Références :



Portées
communiquées
sur demande