

Document à accès immédiat

DEM'Eaux Thau : résultats des essais de traçages artificiels

Rapport final

BRGM/RP-71758-FR

Version 0 du 24 novembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

V. Leonardi, V. Bailly-Comte, P. Brunet et C. Lamotte

Vérificateur :

Nom : Jean-Christophe Maréchal

Fonction : Responsable d'unité

Date : 19/07/2022

Signature :



Approbateur :

Nom : Anne-Valérie HAU BARRAS

Fonction : Directrice régionale Occitanie

Date : 01/12/2022

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



PROJET COFINANCÉ PAR LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Karst, Traçage artificiel, Source sous-marine, Inversac, Thau, Vise, Transport, TRAC, Solution analytique, Paramètres hydrodispersifs

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

V. Leonardi, V. Bailly-Comte, P. Brunet et C. Lamotte (2022) – DEM'Eaux Thau : résultats des essais de traçages artificiels. Rapport final V0. BRGM/RP-71758-FR, 53 p., 30 fig., 6 tabl.

Synthèse

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017, vise à caractériser l'hydrosystème de Thau afin de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale. Cette étude scientifique pluridisciplinaire implique de caractériser à la fois la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème sur un territoire soumis à des enjeux économiques importants (thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme ...), à la fragilité de l'équilibre qui existe entre les différentes ressources en eaux souterraines (inversacs) et à la complexité du comportement des différents réservoirs souterrains.

Le BRGM est le pilote de ce projet de recherche. Les trois autres partenaires opérationnels du projet sont les laboratoires Géosciences Montpellier, Hydrosiences Montpellier et l'entreprise Synapse. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT ainsi que les partenaires opérationnels.

Le présent rapport constitue le livrable L8 du projet relatif aux opérations de traçages artificiels. Cette tâche avait pour objectifs de :

1. synthétiser l'ensemble des connexions hydrauliques mises en évidence par traçage réalisés depuis les années 60 dans le secteur d'étude, et principalement sur un axe reliant la zone de recharge constituée par le Causse d'Aumelas aux différents exutoires karstiques ;
2. proposer de nouveaux essais de traçages pour mieux comprendre l'organisation du drainage depuis le massif de la Gardiole vers les sources de Cauvy et d'Ambressac ;
3. réaliser un nouvel ensemble de traçages depuis le puits aménagé de la source de la Vène jusqu'aux exutoires d'Issanka pour étudier l'évolution des modalités de transport, et notamment le taux de restitution selon les conditions hydrologiques. Cette opération avait pour but de préciser le fonctionnement de l'hydrosystème et mettre en évidence une possible diffuence des eaux tracées vers l'exutoire (de la Vise).

La synthèse bibliographique sur les traçages antérieurs a notamment permis de valoriser les *traçages récents réalisés depuis la cavité du Puits de l'aven dans le Coulazou en 2010 (Selles et al., 2011)*, ainsi que le traçage réalisé depuis la Vise en 2008 lorsque celle-ci fonctionnait en inversac (Brunet et al., 2008).

Concernant le second objectif, un essai de traçage a été réalisé depuis le forage du Cèdre ([BSS003CJNI](#)) après avoir réalisé une inspection par caméra de cet ouvrage. Aucun autre point plus propice à une injection depuis le massif de la Gardiole n'a pu être trouvé. Le suivi de ce traçage aux sources de Cauvy et d'Ambressac a été perturbé par la mise en place du confinement de 2020 et n'a donné aucun résultat exploitable.

Le troisième objectif a été atteint par la réalisation de 8 essais de traçages pour des conditions hydrologiques différentes mais proche du régime permanent lors de la restitution, couvrant ainsi l'ensemble des conditions hydrologiques jusqu'au débordement de la source de la Vène. La forme des courbes de restitution obtenues est très différente selon les conditions hydrologiques : les traçages réalisés en hautes eaux se caractérisent par une courbe fortement asymétrique laissant apparaître un pic de concentration très marqué, tandis que pour les traçages réalisés en basses eaux, la courbe présente une allure plus classique. La représentation semi-logarithmique de ces courbes montre qu'elles présentent toutes une évolution asymptotique exponentielle, avec une pente comparable d'une courbe à l'autre.

L'interprétation des résultats n'a pas permis de mettre en évidence une évolution significative du taux de restitution selon les conditions hydrologiques. La fluorescence suivie à la source de la Vise de manière discontinue du fait de la détérioration des sondes par la salinité n'a pas permis de mettre en évidence le passage du traceur. Au-delà des difficultés techniques, il est probable que la dilution, ainsi que la dispersion associée au temps de transfert beaucoup plus long conduisent à des concentrations à la Vise probablement en dessous du seuil de détection des appareils, de l'ordre du ppb. La réalisation de cette opération de traçages successifs n'a donc pas permis de mieux comprendre le fonctionnement d'une éventuelle diffluence alimentant la source de la Vise.

Une modélisation analytique s'appuyant sur les concepts monodimensionnels d'advection/dispersion a été proposée à l'aide du logiciel TRAC (Gutierrez et al., 2012, 2013) pour reproduire le transfert dans le réseau karstique. Deux modèles analytiques ont été testés :

- un modèle 2DM représentant 2 chemins représentatifs d'un transport advectif-dispersif et utilisant 5 paramètres ;
- un modèle d'écoulement proposé dans le cadre de ce projet : ce modèle appelé EDM correspond à la mise en série d'un modèle dispersif et d'un modèle de mélange parfait exponentiel. Il nécessite de caler 3 paramètres relatifs au temps de déplacement par advection, le temps de stockage dans le réservoir exponentiel et un terme de répartition pour court-circuiter le réservoir de stockage, sachant qu'un 4^{ème} paramètre relatif à la dispersion est fixé et commun à l'ensemble des simulations (nombre de Péclet de 200).

Seul le modèle EDM a permis de parfaitement reproduire la forme des courbes de restitution à long terme et leur comportement asymptotique. L'interprétation des résultats obtenus selon ce modèle ont montré qu'une part variable du flux de traceur séjourne dans un réservoir parfaitement mélangé pendant une durée de +/-3 jours avant d'être transporté par le réseau karstique jusqu'aux sources d'Issanka, quelles que soient les conditions hydrologiques. Ainsi, en crue, ce stockage temporaire a une forte influence sur la dissymétrie de la courbe obtenue tandis qu'en basses eaux ce stockage partiel de 3 jours devient négligeable devant le temps de transfert dans le réseau karstique. La courbe retrouve ainsi en basses eaux une forme classique de restitution selon un modèle d'advection-dispersion.

L'intérêt de réaliser des opérations de traçage complémentaires depuis le massif de la Gardiole est toujours d'actualité et recommandé pour comprendre l'organisation du drainage vers les sources de Cauvy et d'Ambressac.

Il est également préconisé de maintenir et performé le suivi quantitatif des exutoires du système de Thau, en particulier des sources d'Issanka, pour disposer de chroniques fiables et à un pas de temps fin.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. PROJET DEM'EAUX THAU	9
1.2. CONTEXTE	9
1.3. OBJECTIF.....	10
2. Anciens traçages réalisés sur le site d'étude.....	13
2.1. SYNTHÈSE DE TRAÇAGES « HISTORIQUES »	13
2.2. TRAÇAGE « PUITS DE L'AVEN À LA SOURCE DE LA VENE »).....	15
2.2.1. Contexte, matériels et méthodes	15
2.2.2. Résultats	16
2.3. TRAÇAGE DE LA SOURCE DE LA VISE VERS LES FORAGES THERMAUX (BRUNET ET AL. 2008).....	19
3. Traçages artificiels et variabilité hydrologique sur le système Vène - Issanka	21
3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE	21
3.2. MODALITÉS D'INJECTION ET DE RESTITUTION DES DIFFÉRENTS TRAÇAGES.....	23
3.2.1. Modalités d'injection	23
3.2.2. Modalités de restitution.....	25
3.3. OPÉRATIONS DE TRAÇAGES COMPLÉMENTAIRES.....	29
3.4. ANALYSE DES RÉSULTATS DE RESTITUTION.....	30
4. Interprétation des propriétés hydrodispersives et modèle conceptuel d'écoulement.....	35
4.1. OBJECTIFS	35
4.2. CHOIX DES MODÈLES ANALYTIQUES	35
4.3. RÉSULTATS.....	38
4.3.1. Résultats graphiques du modèle dispersif avec 2 chemins d'écoulement (2DM)	38
4.3.2. Résultats graphiques du modèle dispersif avec stockage temporaire du traceur (EDM).....	38
4.3.3. Paramètres et efficacité des modèles	41
4.4. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION	42
4.4.1. Conséquences sur le modèle conceptuel des écoulements entre la Vène et Issanka.....	45
5. Conclusion.....	49
6. Bibliographie	51

Liste des figures

Figure 1 A -	Carte géologique représentant la zone d'injection et les zones de restitution des traçages artificiels réalisés dans le projet DEM'Eaux Thau. B- Carte d'altitude du toit du Jurassique supérieur (Réservoir aquifère karstique régional) avec le tracé de la coupe représentée en C. C- Coupe N-S passant par la zone d'injection de la source de la Vène (compartiment amont) et des zones de restitution suivies d'Issanka – Vise – presqu'île de Balaruc les Bains.(Cartes et coupe modifiées d'après Hemelsdaël et al., 2021)	11
Figure 2 :	Carte géologique simplifiée, modifiée d'après Bailly-Comte et al. (2008). Les systèmes « traçages » sont indiqués par des flèches et des numéros en rouge (pour les caractéristiques, se référer au Tableau 1).	15
Figure 3 :	Suivi hydrodynamique du système traçage et courbe de restitution du traçage à la source de la Vène : A) Conditions de recharge du système : Pluviométrie enregistrée au poste des Blaquières (mm); B) Conditions hydrodynamiques du système : Débit de la rivière Coulazou (m ³ /s) et niveau piézométrique dans le forage PZ2 de la station de Sainte Cécile amont (cm NGF); C) Réponse à l'exutoire du système : Débit à la source de la Vène (m ³ /s) et courbe de flux massique de traceur restitué à la source de la Vène (g/s). D) Spectres d'émission pour les deux pics de restitution (5/03/10 et 12/03/10) et pour un échantillon témoin (blanc) sans uranine (d'après de Selles et al., 2011).	16
Figure 4 :	Schéma conceptuel d'un système traçage dans un aquifère karstique avec un niveau de connexion permettant la circulation du traceur entre les différents siphons (en considérant la présence potentielle d'échanges extérieurs au système).	18
Figure 5 :	A : Photographie du traceur à la source sous-marine de la Vise. B : Concentration en ppb de la fluorescéine dans les 3 forages hydrothermaux de Balaruc les Bains (F5, F6 et F9bis).	20
Figure 6 :	Carte topographique du site d'étude du système-traçage source de la Vène – Issanka. En bleu, le nom des différentes sources, dont celles de Cauvy et Ambressac de la presqu'île de Balaruc les Bains et la source sous-marine de la Vise.	21
Figure 7 :	Vue sur l'étang de Thau et la source de la Vise depuis Balaruc-les-Bains	22
Figure 8 :	Schéma conceptuel de l'écoulement au sein et au voisinage du gouffre de la source de la Vise (figure issue du rapport BRGM/RP-50787-FR).	22
Figure 9 :	Opération d'injection du traceur « Fluorescéine » à la source de la Vène, selon un protocole reproduit à l'identique lors des différents essais de traçages du projet.	23
Figure 10 :	(a) Caractéristiques des modalités d'injection des traçages réalisés à la source de la Vène entre juillet 2018 et juillet 2020 avec la numérotation des différents tests utilisée dans le Chapitre 4; (b) Evolution des niveaux d'eau à la source de la Vise entre juillet 2018 et juillet 2020 (base de données ADES). Les points colorés correspondent aux différentes périodes d'injection. Des zones de transition (1 et 2) sont marquées par des ruptures de pente, la transition 1 correspond à l'écoulement à la source de la Vène.	25
Figure 11 :	Coupe schématique du système aquifère d'Issanka et trajets supposés des traceurs injectés depuis la source de la Vène (modifié d'après Hemelsdaël et al. 2021)	26
Figure 12 :	Sources d'Issanka : Installation d'un fluorimètre dans le collecteur des différentes sources d'Issanka, et vues relatives de ce collecteur par rapport à différents pavillons, avec la source du pavillon de Bourges. La canal venturi est localisé en aval des sources, sur la rivière de la Vène.	26
Figure 13 :	Plan de localisation du champ captant des sources d'Issanka. Les différents lieux encadrés ont été équipés de fluorimètres pour le 1 ^{er} traçage afin d'identifier le lieu le plus représentatif.	27
Figure 14 :	Courbes de restitution de la concentration en ppb (µg/l) de la fluorescéine dans le champ captant des sources d'Issanka (voir plan Figure 3-7).	29

Figure 15 :	Correction de dérive lors de la restitution du test#8 le 11/07/2018 à 11:40	30
Figure 16 :	Courbes de DTS calculées à partir des données de concentration des traçages restitués au niveau de la source d'Issanka et des débits de prélèvement d'eau au niveau du captage de la source d'Issanka.....	30
Figure 17 :	Courbes de concentration des traçages restitués au niveau des sources d'Issanka, représentation linéaire (A) et semi-logarithmique (B).	31
Figure 18 :	Temps de première apparition et d'atteinte du pic de concentration de chaque traçage en fonction de la profondeur du niveau d'eau au moment de l'injection.....	32
Figure 19 :	Relation linéaire entre les débits aux sources d'Issanka et les hauteurs d'eau à la source de la Vène (R^2 : coefficient de corrélation de la droite de régression linéaire) ...	33
Figure 20 :	Taux de restitution en fonction de la profondeur d'injection (Numéro des tests : voir Tableau 5).Tableau 5 : Synthèse des données de restitution des traçages	33
Figure 21 :	Schéma conceptuel du modèle 2DM (avec Pe [-] : nombre de Péclet, t_{adv} [s] : le temps caractéristique d'advection ; a_1 [-] :le coefficient de partage ; $C(t)$ [$\mu\text{g/l}$] : la concentration du traceur au cours du temps et M [kg] : la masse du traceur injectée)..	36
Figure 22 :	Schéma conceptuel du modèle EDM (avec Pe [-] : nombre de Péclet, t_{adv} [s] : le temps caractéristique d'advection ; a_{DM} [-] :le coefficient de répartition du flux (bypass) ; $C(t)$ [$\mu\text{g/l}$] : la concentration du traceur au cours du temps et M [kg] : la masse du traceur injectée)	37
Figure 23 :	Résultats du calage du modèle 2DM pour les 8 essais en coordonnées linéaires (en haut) et semi-log (en bas). Légende : Points noirs : Concentration mesurée ; Courbe rouge : simulation par le modèle 2DM ; Courbe discontinue orange : transfert DM rapide ; Courbe discontinue verte : transfert DM lent	39
Figure 24 :	Résultats du calage du modèle EDM pour les 8 essais en coordonnées linéaires (en haut) et semi-log (en bas). Légende : Points noirs : Concentration mesurée ; Courbe rouge : simulation par le modèle EDM ; Courbe discontinue orange : transfert DM correspondant sans considérer le stockage temporaire	40
Figure 25 :	Évolution des nombres de Péclet calculés pour les 2 chemins d'écoulements selon le modèle 2DM en fonction du niveau d'eau à la source de la Vène lors de l'injection..	43
Figure 26 :	Évolution des temps caractéristiques t_{adv} et T_{exp} calculés pour le modèle EDM en fonction du niveau d'eau à la source de la Vène lors de l'injection	44
Figure 27 :	Relation entre le débit et la vitesse d'écoulement calculée pour les résultats du modèle EDM	44
Figure 28 :	Schéma représentant l'évolution du sens de circulation de l'eau dans le drain alimentant la source de débordement de la Vène selon les conditions hydrologiques. .	46
Figure 29 :	Comparaison des niveaux piézométriques aux sources d'Issanka (courbe noire) avec celui de la source la Vène (courbe rouge), au niveau du piézomètre BSS002JDBC.....	47
Figure 30 :	Coupe conceptuelle du fonctionnement karstique entre la source de la Vène et celles d'Issanka, sous le bassin de Montbazin Gigean. Le déplacement du traceur est représenté schématiquement en vert dans les conduits karstiques dessinés en bleu. Entre 40 % et 50 % du traceur est restitué aux sources d'Issanka, alors que le reste continue vers le compartiment aval. Une zone de stockage existant à proximité de la source de la Vène est signalé par un cercle noir pointillé. Le niveau piézométrique (NP) est représenté en trait pointillé bleu en Hautes Eaux (HE), en trait pointillé rouge en Basses Eaux (BE). t_s représente le temps de séjour du traceur dans la zone de stockage temporaire, t_t représente le temps de transfert du traceur sur la distance Sce de la Vène – Sce d'Issanka (trajet apparent représenté par la flèche verte pointillée).....	50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste et caractéristiques des traçages historiques réalisés dans le Secteur d'Aumelas-Thau, de 1960 à 2012.....	14
Tableau 2 : Caractéristiques de l'expérience de traçage entre la perte du Puits de l'Aven et la source de la Vène (d'après Selles et al., 2011).....	17
Tableau 3 : Légende colorée des conditions hydrologiques des différents traçages	24
Tableau 4 : Bilans de masse des restitutions observées aux 4 points de suivis	28
Tableau 5 : Synthèse des données de restitution des traçages.....	32
Tableau 6 : Résultats du calage des modèles DM, 2DM et EDM (Id : numéro de l'essai ; R(%) : Taux de restitution ; Q(l/s) : Débit. - Paramètres du modèle 2DM - a_1 et a_2 : coefficients de partage des transferts rapides (1) et lents (2) ; Pe_1 et Pe_2 : nombre de Péclet des transferts rapides (1) et lents (2), t_{adv1} et t_{adv2} : temps caractéristiques d'advection des transferts rapides (1) et lents (2) ; Nash : critère de Nash - Paramètres du modèle EDM – a_{DM} : coefficient de répartition ; Pe : nombre de Péclet, t_{adv} : temps caractéristique d'advection ; T_{exp} : temps de séjour du traceur dans le réservoir de stockage temporaire ; Nash : critère de Nash.....	41

1. Introduction

1.1. PROJET DEM'EAUX THAU

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017, vise à caractériser l'hydrosystème de Thau afin de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale. Cette étude scientifique pluridisciplinaire implique de caractériser à la fois la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème sur un territoire soumis à des enjeux économiques importants (thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme ...), à la fragilité de l'équilibre qui existe entre les différentes ressources en eaux souterraines (inversacs) et à la complexité du comportement des différents réservoirs souterrains.

Le BRGM est le pilote de ce projet de recherche. Les trois autres partenaires opérationnels du projet sont les laboratoires Géosciences Montpellier, Hydrosiences Montpellier et l'entreprise Synapse. Ce projet est financé par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, l'État et la Région (CPER), l'Europe (FEDER), Montpellier Méditerranée Métropole, la ville de Balaruc-les-Bains, le SMBT ainsi que les partenaires opérationnels.

Le présent rapport constitue le livrable L8 du projet relatif aux opérations de traçages artificiels.

1.2. CONTEXTE

Les traçages artificiels en milieu karstique, utilisés dès le début du XX^{ème} siècle, permettent d'identifier les bassins d'alimentation des sources karstiques majeures, en reliant les zones de perte dans lesquelles les traceurs sont injectés aux sources. De nombreux traçages dans la région du bassin de Thau ont été réalisés dans les années 1970-90, permettant ainsi d'identifier les relations entre les formations karstifiées affleurantes sur le Causse d'Aumelas et les sources d'Issanka (Bonnet et Paloc, 1969 ; Gayet, 1979 ; Ladouche *et al.*, 2019), (*Figure 1*). Ces traçages historiques utilisaient déjà des traceurs fluorescents, et notamment l'uranine, mais leur détection à l'exutoire n'utilisait que les propriétés de coloration de l'eau, en reconcentrant le signal aux exutoires à l'aide de charbons actifs (fluocapteurs). L'apparition d'une coloration à l'exutoire ou dans l'éluat du fluocapteur permettait de conclure sur l'existence d'une relation hydraulique et une estimation du temps de transfert du pic de concentration. Les techniques d'analyses spectrofluorimétriques sur échantillons ont par la suite permis de proposer des méthodes quantitatives d'analyse de la dynamique de restitution des traceurs, permettant de décrire les modalités de transfert dans le milieu karstique. L'apport de fluorimètres de terrain depuis le début des années 2000, enregistrant en continu la concentration du traceur restitué à la source, a permis d'avoir une approche quantitative de ces opérations de traçage avec un pas de temps d'acquisition infra horaire. Ainsi, les taux de restitution des traceurs peuvent être mieux évalués, et des modèles de transport peuvent être construits sur la base de ces résultats pour caractériser les propriétés hydro-dispersives du milieu, et tester des hypothèses de chemins préférentiels des eaux souterraines.

Dans la région du Causse d'Aumelas – Bassin de Thau, nous savons, d'après des traçages artificiels anciens (Bonnet et Paloc, 1969 ; Gayet, 1979), qu'il existe une relation hydraulique entre la zone des Causses et les sources d'Issanka ; alors que des travaux plus récents ont montré une relation entre la source de la Vise et des forages thermaux de Balaruc des Bains (Brunet *et al.*, 2008). Cependant aucune étude n'a pu identifier de lien direct entre le *Compartiment Amont* de la zone des Causses, et la source de la Vise comprise dans le *Compartiment Aval* (*Figure 1*). Ladouche *et al.* (2001) ont permis d'établir un 1^{er} traçage avec

suivi temporel de la concentration du traceur aux sources d'Issanka (*Compartiment aval*) après injection à la source de la Vène (*Compartiment Amont*). Cependant, ce 1^{er} traçage quantitatif n'a pas permis d'identifier le rôle des conditions hydrologiques dans la variabilité des taux de restitution entre ces deux compartiments. En effet, selon les conditions hydrologiques, les restitutions peuvent être très différentes (Bailly-Comte *et al.* 2021), et aucune étude jusqu'à présent n'a identifié l'évolution temporelle des relations hydrauliques de ces deux compartiments de cette zone d'étude Aumelas – Thau.

1.3. OBJECTIF

Dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, après avoir compilé les traçages réalisés depuis les années 1960 sur le Causse d'Aumelas et le Bassin de Thau, nous nous sommes focalisés sur la relation entre le *Compartiment amont* et le *Compartiment aval* (Figure 1), afin de proposer un schéma conceptuel des circulations d'eaux souterraines entre ces deux compartiments. La répétition de traçages en différentes conditions hydrologiques entre ces compartiments nous permet une quantification des taux de circulation en profondeur selon les différents chemins identifiés et les modalités du transfert déduites de l'application de modèles analytiques simples selon les conditions hydrogéologiques : ainsi 8 traçages ont été réalisés dans des modalités d'injection et de suivi de restitution identiques entre la source de la Vène et les sources d'Issanka, nous permettant d'obtenir une estimation quantifiée au plus juste des modalités de transfert de l'eau entre les deux compartiments pour différentes conditions hydrologiques.

L'interprétation et la modélisation sous TRAC (Gutierrez *et al.*, 2013) de l'ensemble de ces traçages ont permis de répondre à cet objectif de tester différentes hypothèses de circulation permettant d'aboutir à un modèle conceptuel et de quantifier des écoulements se produisant depuis l'amont vers l'aval, selon les différentes conditions hydrologiques saisonnières, et de discuter de la contribution de ce système traçage à l'alimentation de la source de la Vise selon les conditions hydrogéologiques. Ainsi, au-delà de mieux comprendre les modalités de transferts d'eau dans la partie captive du système karstique d'Issanka, l'objectif principal de ce travail est d'identifier une éventuelle variation des taux de restitution des traceurs selon les conditions hydrologiques pour mieux comprendre un mécanisme probable de diffuence vers la source de la Vise.

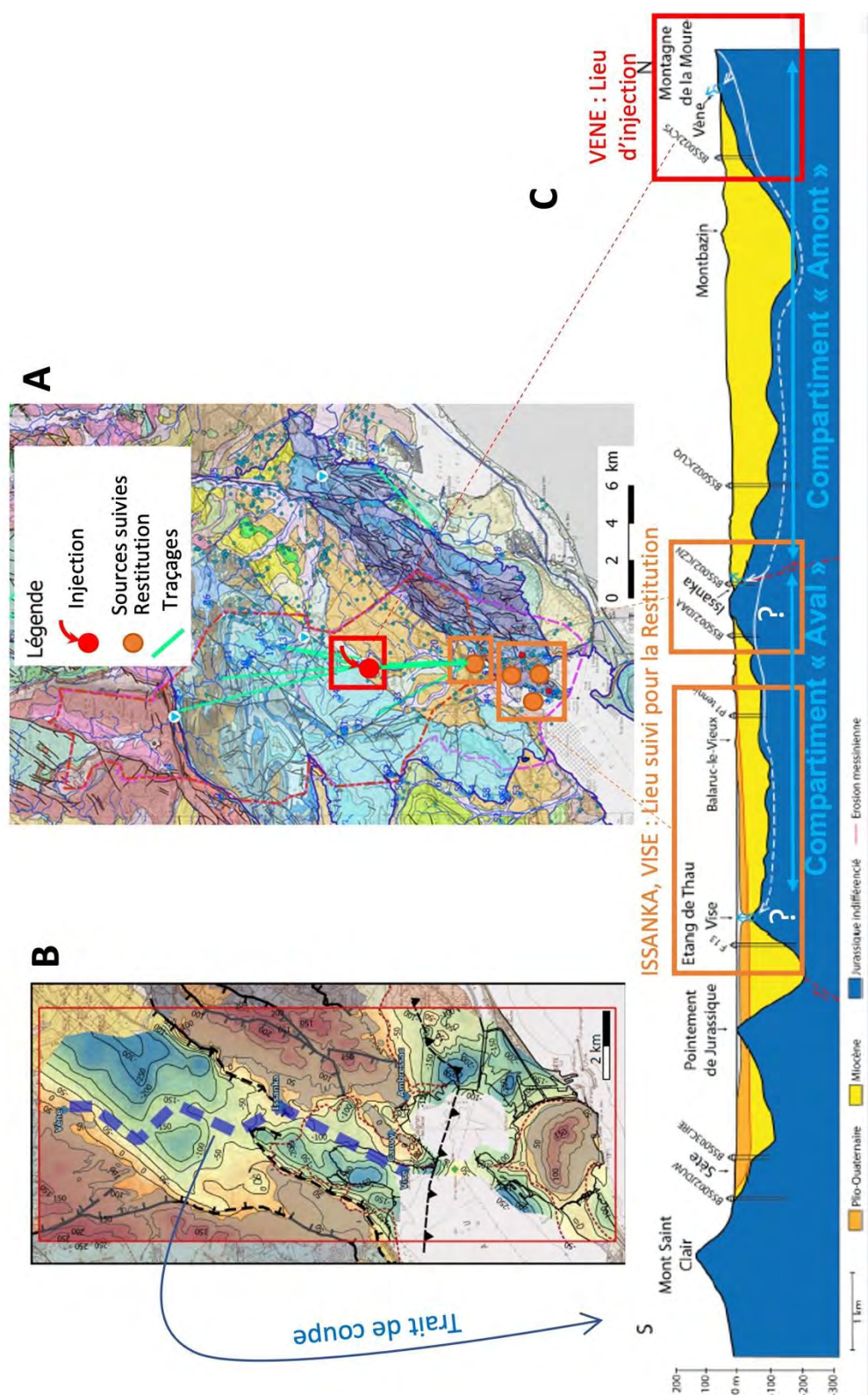


Figure 1 A - Carte géologique représentant la zone d'injection et les zones de restitution des traçages artificiels réalisés dans le projet DEM'Eaux Thau. B- Carte d'altitude du toit du Jurassique supérieur (Réservoir aquifère karstique régional) avec le tracé de la coupe représentée en C. C- Coupe N-S passant par la zone d'injection de la source de la Vène (compartiment amont) et des zones de restitution suivies d'Issanka – Vise – presqu'île de Balaruc- les-Bains. (Cartes et coupe modifiées d'après Hemelsdaël et al., 2021)

2. Anciens traçages réalisés sur le site d'étude

2.1. SYNTHÈSE DE TRAÇAGES « HISTORIQUES »

Différentes opérations de traçages ont été réalisées depuis les années 1960 jusqu'aux années 2000, celles-ci par différents organismes et différents auteurs (Bonnet et Paloc, 1969 ; Gayet, 1979 ; Ladouche *et al.*, 2001 ; Brunet *et al.*, 2008, Selles, 2010 et Selles *et al.*, 2011).

Ces traçages concernent essentiellement l'axe « Aumelas – Presqu'île de Thau », réalisés pendant différentes périodes hydrologiques avec différents moyens d'analyse selon les époques. On notera que seulement deux traçages ne concernent pas cet axe « Aumelas – sources de la presqu'île de Thau » : le premier situé au Sud de la montagne de la Gardiole, avec une restitution à la source de la Roubine du Vic (Bonnet et Paloc, 1969 ; numéro 1 dans Figure 2 et Tableau 1 ; l'autre concerne le traçage atypique réalisé au sein de la source de la Vise pendant un inversac et restitué sur un des forages des Thermes de Balaruc (Brunet *et al.*, 2008, voir paragraphe 0) (numéro 10, Figure 2 et Tableau 1).

Avant les années 2000, ces traçages ont permis d'établir les relations hydrauliques entre différentes pertes localisées, sur, ou à proximité du Causse d'Aumelas, et le système de sources du système d'Issanka / Vise, le traceur circulant sous le bassin de Montbazin-Gigean, dans les calcaires du Jurassique supérieur. Ces traçages « qualitatifs » ont permis d'estimer des vitesses apparentes entre le moment où le traceur a été injecté et le moment où il est restitué à la source.

Après les années 2000, l'apparition d'appareils de mesure tel que les fluorimètres de terrain ont permis de quantifier ces restitutions en termes de taux de restitution ou de dispersivité du milieu. Ainsi les traçages de Ladouche *et al.* (2001), Brunet *et al.* (2008) et Selles (2010), réalisés sur l'axe depuis Aumelas-Vène jusqu'à Issanka-Vise permettent d'estimer des taux de restitution variables selon les périodes hydrologiques « hautes-eaux / basses-eaux ».

Les différentes courbes de restitution issues de ces travaux post année 2000, sont présentées dans les chapitres suivants concernant Brunet *et al.* (2008) et Selles *et al.* (2011).

Afin de pouvoir synthétiser l'ensemble de ces différents traçages et de les comparer les uns aux autres, la carte de la Figure 2 et le Tableau 1 ont été réalisés : ce tableau présente les caractéristiques principales de tous ces traçages réalisés depuis les années 1960 jusqu'au début de cette étude.

Références	N° traçage sur carte de la figure 2.2	INJECTION							REAPPARITION										Remarques
		Coordonnées en Lambert 3		Acteur du traçage	Date d'injection	Nom du lieu d'injection (n° sur la fig. 2.2)	Volume injecté ou Q naturel	Masse injectée (kg)/Traceur	Coordonnées en Lambert 3		Date de réapparition	Nom du lieu de réapparition (n° sur la fig. 2.2)	Débit Naturel moyen (débit)	Durée de Restitution	Mode de détection	Distance (m)	Temps de transit	Vitesse apparente (m/h)	
Bonnet et Paloc, 1969	1	720.39	137.37	BRGM (Paloc)	3/9/68	Rivière souveraine de la Madeleine (n°48)	Q nat. = 40 l/s	2, fluo	716.78	133.99	30/12/66	Roubine du Vic (n°46)	100 l/s	env. 3 mois	Fluocapteur	5000	2068 h	2.4 m/h	Cauvy, Ambressac et Source de la Madeleine étaient surveillées par des fluocapteurs sans résultats
Bonnet et Paloc, 1969	2	710.77	142.39	BRGM (Paloc)	8/12/68	Event-Perte de Courmonterral (n°13)	Vinj. = 340 m³ en 2 jours	10, fluo	710.14	131.96	31/12/1968	Source d'Issanka (n°43)	500 l/s	env. 1 mois	Fluocapteur	10500	552 h	19 m/h	Sorties suivies : Issanka, Vène, Cauvy, Ambressac, Roubine de Vic, Oulettes, Veyrac et Cambellès. 1er réponse à Issanka puis à la Vée après une crue
									709.77	138.03	? Fin décembre	Source de la Vène (n°9)	?	?	Fluocapteur	4500	1296 h	3 m/h	
Bonnet et Paloc, 1969	3	709.77	138.03	BRGM (Paloc)	30/6/69	Source de la Vène (n°9)	Vinj. = 100 m³ en 2 jours	10, fluo	710.14	131.96	5/7/1969	Source d'Issanka (n°43)	500 l/s	visible œil nu pendant 12j	Fluocapteur et Visible à l'œil nu	6100	110 h	55m/h	Sorties suivies : Issanka, Abysse, Cauvy, Ambressac, Roubine de Vic, Cambellès et forages
Gayet, 1979	4	709.02	145.59	SCAL	28/10/62	Perte n°2 du Coulazou (n°30)		10, fluo	709.77	138.03	1/11/62	Source de la Vène (n°9)		env. 96h	Fluocapteur	7 600	100 h	76 m/h	Première en terme de mise en évidence du lien Perte du Coulazou - S. de la Vène
Gayet, 1979	5	707.23	147.90	SCAL	23/5/63	Perte n°1 du Coulazou (n°36)	Q nat. = 5 l/s	?	709.77	138.03	5/6/63	Source de la Vène (n°9)				10 300	766 h	13 m/h	Sorties suivies : Sources d'Issanka (traçage négatif) et de l'Abysse (impossibilité de relever les fluocapteurs)
Gayet, 1979	6	707.15	137.20	BRGM (Paloc)	21/3/71	Event Perte de la Selette (n°35)	Q nat. = 4 l/s	5, fluo	707.89	135.93	22/3/71	Source des Oulettes (n°33)	300 l/s		Fluocapteur et Visible à l'œil nu	1 500	env. 24h	env. 60 m/h	D'après Gayet (1979), ce traçage aurait été positif également au boudou de Malacade et la source de la Vène, cependant Paloc (doc Interne) ne parle que des Oulettes et d'Issanka.
									710.14	131.96	?	Source d'Issanka (n°43)				6 000			
Bérard, 1995	7			BRGM	8/12/83	F5 forage thermal (n°5)	A 210 m de profondeur, Vinj = 20 m³	1, fluo			12/12/83	Source de la Vise (n°3)			Fluocapteur	300 m SE	env. 96h	env. 3 m/h	Ce suivi de la Vise a été réalisé par fluocapteur dans le puits de reprise du GAEC "Polissons du Soleil", sur le bord de l'étang de Thau. Un suivi sur le forage F2 a été négatif
Ladouce et al., 2001	8	709.43	130.13	BRGM	21/1/00	Forage L1 de la CGE	Niveau piézo : -6,24 m /sommet forage Vinj = 5 m³	1,3, SulfatoRho	Traçage Négatif ! Point suivis : Source de la Vise, d'Issanka, de Cauvy, d'Ambressac et les forages thermaux F5 et F6 (voir tableau joint) Multi-traçage réalisé en même temps que le traçage présenté ci-dessous										
Ladouce et al., 2001	9	709.77	138.03	BRGM	21/01/2000 10h30	Source de la Vène (n°9)	Niveau source : -12,62 m / sommet tube Vinj = 2 m³	3, fluo	710.14	131.96	25/1/00	Source d'Issanka (n°43)	200 l/s	35 j	Préleveur automatique + contrôle manuel	6 100	1er arrivée 91h Plc 115h	53 m/h 67 m/h	Le taux de restitution a été estimé à 85%. Les sources de Cauvy, de la Vise, d'Ambressac, et les forages thermaux F5 et F6, suivis par des préleveurs automatiques et/ou des suivis manuels ont été négatifs à ce traçage.
Brunet et al., 2008	10			Hydrosciences Montpellier	30/01/2008 15h30	Source de la Vise (n°3)	Pendant période d'inversac, la source a aspiré tout le traceur	1,6, fluo			2 pics, maxima le 13/02 à 20h et du 14/02 à 22h	F5 forage thermal (n°5)	-	double pic, environ 4j (env. 100h)	Fluorimètre en forage	300 m SE	340 h	env. 1 m/h	La quantité restituée a été estimée de l'ordre d'1 gramme. Double pic avec un maximum de concentration de 2-3 ppb
											12/02 à 18h	F6 forage thermal (n°5)	-	augmentation et diminution brutale, incertitude liée à une coupure d'eau du forage de 24h. Durée de restitution comprise entre 24h et 48h (36h ?)	Fluorimètre en forage	300 m NE	314 h	env. 1 m/h	La quantité restituée est estimée de l'ordre de 2 grammes.
											06/02/2008	F9 forage thermal (n°5)	-	environ 240 h (10 j)	Fluorimètre en forage	350 m	180 h	env. 2 m/h	Un pic très étalé, qui commence le 06/02, s'achève autour du 15/02 et atteint son maximum le 09/02. Quantité restituée inférieure au gramme
Selles, 2010 Selles et al., 2011	11	711.05	143.30	Hydrosciences Montpellier	26/02/2010 à 15h	Puits de l'Aven (n°17)	Directement dans le puits de l'Aven, niveau d'eau < 48.30 m NGF	0,8, fluo	709.77	138.03	2 pics, 1er pic 170h, 2ème pic 320h après injection	Source de la Vène (n°9)	Débit variable entre 0.1 et 1.5 m³/s	environ 300 h MAIS si remobilisations le 03/03/10 et du 08/03/10, alors les temps moyens de séjour sont respectivement de 85 heures et de 112 heures (4 et 5 jours)	Fluorimètre + contrôle manuel	5500 m	330 h	En prenant date de remobilisation : 57 m/h pour le pic 1; 40 m/h pour le pic 2 (au lieu de 16 m/h)	Il y a eu mobilisation du traceur après 2 événements pluvieux. Les dates d'injection ont été ré-estimées, au 03/03/2010 à 18h et au 08/03/2010 à 19h au lieu de l'injection du 26/02. Le taux de restitution est de 10% puis 13% pour chaque pic successif.
									710.14	131.96	14/03/2010 vers 12h	Source d'Issanka (n°43)	-	environ 200h	Fluorimètre + contrôle manuel	11 500	environ 11j si date de remobilisation le 03/03/2010	env. 45 m/h si 03/03/10	Aucun traitement n'a pu être possible suite à des problèmes de matériels. Mais on peut estimer une 1er ré-injection le 03/03/2010 à 18h.

Tableau 1 : Liste et caractéristiques des traçages historiques réalisés dans le Secteur d'Aumelas-Thau, de 1960 à 2012

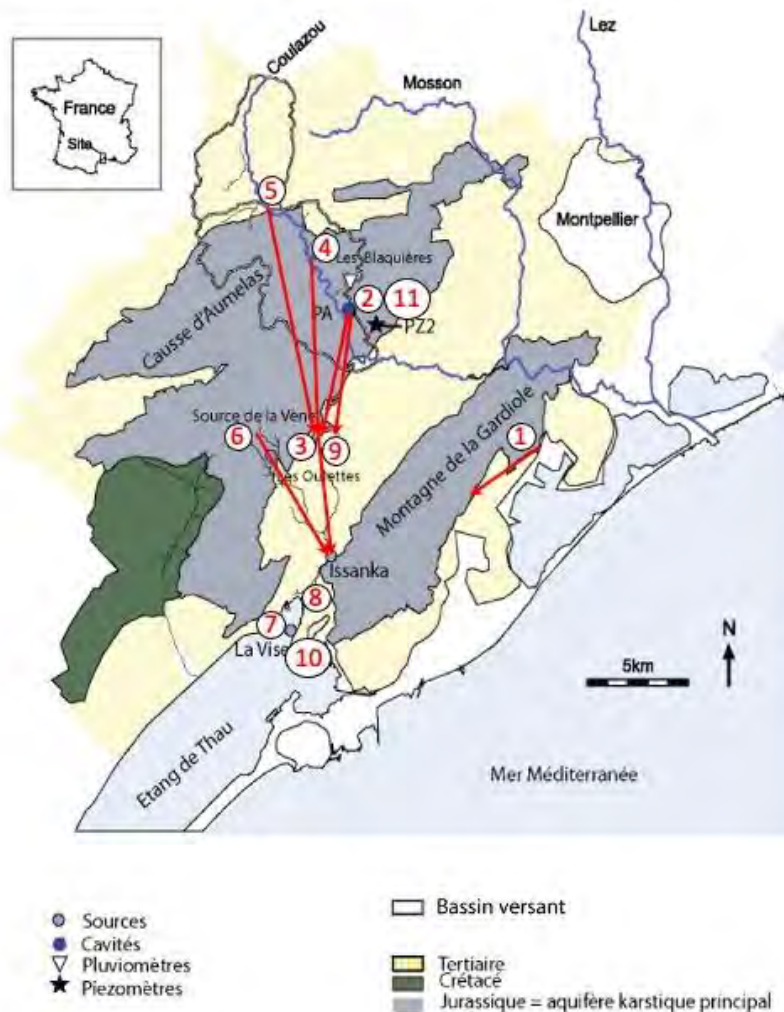


Figure 2 : Carte géologique simplifiée, modifiée d'après Bailly-Comte et al. (2008). Les systèmes « traçages » sont indiqués par des flèches et des numéros en rouge (pour les caractéristiques, se référer au Tableau 1).

2.2. TRAÇAGE « PUIITS DE L'AVEN À LA SOURCE DE LA VÈNE »

2.2.1. Contexte, matériels et méthodes

De nombreuses pertes de la rivière temporaire du Coulazou (Figure 2) sont présentes sur le Causse d'Aumelas (Bonnet et Paloc, 1969). La cavité du Puits de l'Aven (PA sur Figure 2) est l'une des plus importantes. La source temporaire de la Vène draine la partie libre de l'aquifère du Causse d'Aumelas. L'ensemble du système karstique de la perte du Puits de l'Aven jusqu'à la source de la Vène correspond au système traçage de l'étude de Selles *et al.*, (2011).

Une injection d'un traceur artificiel a été réalisée le 26 février 2010 à 15 h dans la première cavité du Puits de l'Aven. Dans le cadre de l'étude, la fluorescéine sodique (uranine) a été choisie comme traceur pour ses caractéristiques adaptées aux traçages des eaux souterraines (Käss, 1998) et sa faible toxicité (Behrens *et al*, 2001) : 780 g d'uranine ont été injectés. Lors de l'injection, le Coulazou était à l'étiage, aucun écoulement n'alimentait la cavité du Puits de l'Aven.

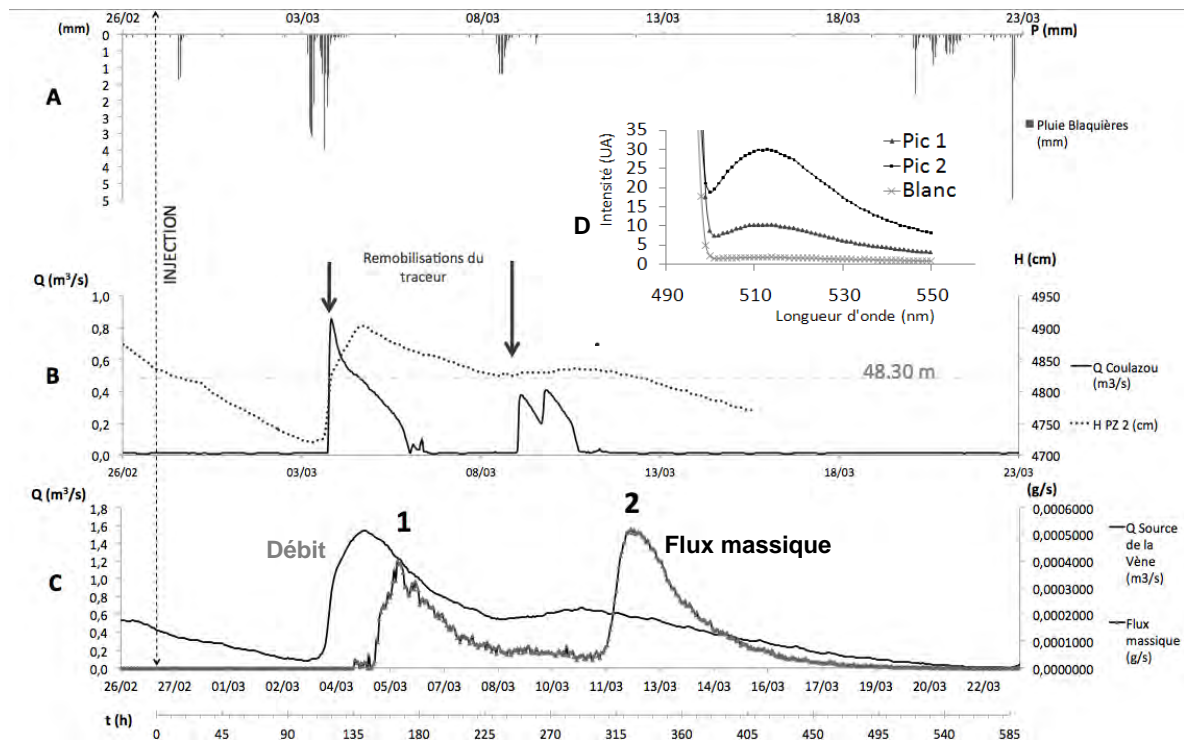


Figure 3 : Suivi hydrodynamique du système traçage et courbe de restitution du traçage à la source de la Vène : **A**) Conditions de recharge du système : Pluviométrie enregistrée au poste des Blaquières (mm); **B**) Conditions hydrodynamiques du système : Débit de la rivière Coulazou (m^3/s) et niveau piézométrique dans le forage PZ2 de la station de Sainte Cécile amont (cm NGF); **C**) Réponse à l'exutoire du système : Débit à la source de la Vène (m^3/s) et courbe de flux massique de traceur restitué à la source de la Vène (g/s). **D**) Spectres d'émission pour les deux pics de restitution (5/03/10 et 12/03/10) et pour un échantillon témoin (blanc) sans uranine (d'après de Selles et al., 2011).

Pour la restitution, un fluorimètre de terrain (Fluorimètre GGUN-FL 20) a mesuré en continu la fluorescence à la *source de la Vène*. Afin de valider les mesures du fluorimètre, des échantillons ont été prélevés à la *source de la Vène* pour ensuite être analysés en laboratoire par spectrofluorimétrie. Un échantillonnage a été réalisé par un préleveur automatique pré-programmé avec un pas de temps de 4h. Les échantillons ont été analysés par le laboratoire HydroSciences Montpellier sur un spectrofluorimètre SHIMADZU RF-5301PC.

Les chroniques de pluviométrie utilisées dans cette étude proviennent du pluviographe des Blaquières au pas de temps horaire. Les suivis piézométriques sont assurés par une sonde SWS de type CTD à la station de Sainte Cécile Amont (PZ2, Figures 2 et 3).

Enfin, les données horaires des débits à la *source de la Vène* ont été fournies par le laboratoire HSM (Tournoud et al., 2006).

2.2.2. Résultats

Durant le mois de suivi de l'expérience, deux épisodes pluvieux principaux ont modifié les conditions hydrodynamiques (Figure 3, A). Le système traçage a été alimenté par la perte du Coulazou au Puits de l'Aven (Figure 2, Figure 3, B), ce qui a favorisé une variation rapide des conditions de recharge lors de l'expérience.

Une restitution bimodale a été observée, avec 160 h de décalage entre les deux pics d'apparition du traceur (Figure 3, C). Les analyses des spectres d'émission effectuées, attestent de la présence du traceur pour chaque pic (Figure 3, D).

Le temps moyen de séjour du traceur dans le système peut être calculé à partir de la courbe de restitution à l'exutoire (Kilpatrick & Wilson, 1989 ; Käss, 1998). Ainsi, on observe un taux de restitution total de 23 % durant cette expérience, ainsi qu'un temps moyen de séjour du traceur d'environ 300 heures calculé pour l'ensemble de la restitution bimodale (Tableau 2, *ligne Courbe complète*).

	Début Injection	Temps moyen de séjour (h)	Vitesse apparente (m/h)	Temps modal (h)	Débit moyen Sce Vène (m ³ /s)	Taux de Restitution
<i>Courbe complète</i>	26/02/2010 15h	300	16.3	332	0.82	23%
<i>Pic 1</i>	03/03/2010 18h	85	57	50	1.97	9.80%
<i>Pic 2</i>	08/03/2010 19h	112	40	88	0.35	12.70%

Tableau 2 : Caractéristiques de l'expérience de traçage entre la perte du Puits de l'Aven et la source de la Vène (d'après Selles et al., 2011).

Ce faible taux de restitution s'explique -(i) d'une part, par l'existence de connexions du système de traçage avec des circulations plus profondes ; -(ii) d'autre part car, pour des raisons techniques, le suivi du traceur à la source de la Vène a dû être interrompu juste après le 2^{ème} pic de restitution.

D'après les rapports spéléologiques (SCAL, 2007) sur les explorations du *Puits de l'Aven*, le conduit principal fait état de 12 siphons minimum. Le déplacement du traceur dans le système ne peut se faire que lorsque tous les siphons sont connectés.

L'observation des variations de charge hydraulique dans le forage PZ2 (Figure 3, B) permet cependant d'identifier deux périodes distinctes dans le système lors de l'expérience. D'après Bailly-Comte *et al.* (2008), les ruptures de pente sur la chronique piézométrique du forage (à 120 h puis 245 h après l'injection) traduisent l'activation d'un réseau karstique supérieur dont le *Coulazou* constitue le niveau de base. Ainsi, lorsque le niveau d'eau mesuré dans le forage PZ2 dépasse 48.30 mNGF, le drainage karstique vers la source de la Vène est actif, tandis que les siphons se désamorcent progressivement pour des niveaux piézométriques inférieurs. Les ruptures de pente identifiées par les flèches verticales sur la Figure 3 marquent ainsi deux périodes de connexion hydraulique permettant de mobiliser le traceur depuis le Puits de l'Aven jusqu'à la source de l'Avène.

Ces deux périodes de connexion sont identifiées sur cette chronique suite aux précipitations (Figure 3, B), concomitantes avec les augmentations du débit du Coulazou (Figure 3, B). Les conditions de connexion/déconnexion des siphons sont clairement induites ici par une infiltration concentrée des eaux de surface du Coulazou dans les pertes du Causse d'Aumelas, permettant une mise en charge rapide de l'aquifère. Cette analyse des données hydrodynamiques permet d'individualiser deux étapes dans la circulation du traceur, soit deux remobilisations de traceur qui expliquent la restitution bimodale (Figure 3).

Considérant ces deux remobilisations du 03/03/2010 et du 08/03/2010, les temps moyens de séjour sont respectivement de 85 heures et de 112 heures (4 et 5 jours) (Tableau 2), fort différents de celui estimé en prenant en compte la restitution dans son ensemble (12 jours). Or, ce temps moyen de séjour est utilisé pour calculer la vitesse apparente du traceur dans le système : celle-ci est estimée à 57 m/h pour le 1^{er} pic et à 40 m/h pour le 2nd (Tableau 2).

Ces valeurs des vitesses apparentes pour chacune des remobilisations du traceur ne sont pas identiques, car les débits moyens varient (Tableau 2) mais ces dernières sont proches ; ce qui nous indique que les conditions structurales et dynamiques à l'origine du déplacement du traceur sont semblables. Enfin, cette étude démontre que la date d'injection du traceur (ici le 26 février) ne nous renseigne pas nécessairement sur la condition à la limite dans l'espace et dans le temps, qui est requise pour l'interprétation analytique d'un traçage. L'analyse de la restitution plurimodale de ce traçage met en évidence une structure complexe avec un effet de piégeage puis de remise en circulation du traceur (Figure 4).

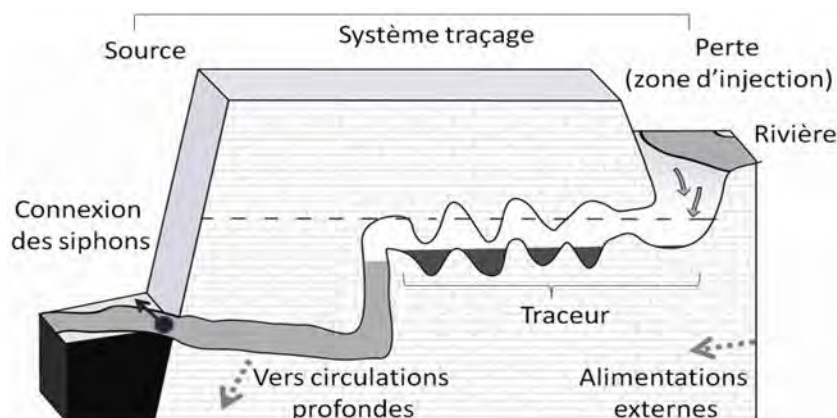


Figure 4 : Schéma conceptuel d'un système traçage dans un aquifère karstique avec un niveau de connexion permettant la circulation du traceur entre les différents siphons (en considérant la présence potentielle d'échanges extérieurs au système).

Malgré le fait que ce phénomène ait déjà été démontré (Goldscheider *et al.*, 2008), il est courant d'expliquer une restitution plurimodale par l'utilisation de plusieurs chemins par le traceur (e.g. Massei *et al.*, 2006 ; Field, 2002 ; Perrin & Luetscher 2008). Or cette étude illustre que l'allure de la restitution du traceur est ici régie par les conditions de recharge provenant de la perte du *Coulazou* et par la structure en siphons successifs. Ainsi, le traceur peut être restitué en plusieurs fois et à fortes concentrations en fonction des conditions hydrodynamiques de l'hydrosystème tout en empruntant un seul drain principal.

2.3. TRAÇAGE DE LA SOURCE DE LA VISE VERS LES FORAGES THERMAUX (BRUNET ET AL. 2008)

Lors de l'épisode d'inversac du 2 janvier 2008, une injection de fluorescéine a été réalisée dans la source de la Vise qui fonctionnait alors en perte (Figure 5, A).

Le but était de mettre en évidence les relations hydrauliques entre la source et les forages de la presqu'île de Balaruc. Pour plus de détails sur ce phénomène, une étude quantitative des conséquences de l'inversac survenu pendant le projet DEM'EAUX Thau est proposée dans le rapport BRGM/RP-70839-FR qui constitue le livrable L11B du projet DEM'EAUX THAU (Maréchal *et al.*, 2022).

L'injection s'est faite le 30 janvier 2008 à 15 h 30, en plongée, avec la libération rapide d'environ dix litres de solution de traceur à l'entrée de la source. Les plongeurs (P. Brunet, HSM et F. Muller, Thermes de Balaruc assistés en surface par F. Hernandez, HSM) ont pu constater l'absorption rapide et totale du traceur par la source. Du fait d'un incident technique, la quantité de traceur injectée n'est pas connue avec certitude mais elle peut être estimée entre 1 500 et 1 800 grammes.

Les points de suivi avaient été définis en concertation avec les thermes de Balaruc et le BRGM : 3 forages thermaux F5, F6 et F9bis plus la source de Cauvy qui avaient été équipés de fluorimètres de terrain de type GGUN. Les enregistrements à la source de Cauvy n'ont pas détecté le passage de traceur lors des 12 semaines suivants l'injection.

Les enregistrements observés sur les forages thermaux qui semblent avoir intercepté une fraction du nuage de traceur (Figure 5, B) n'ont pas pu être confirmés par analyse sur spectrofluorimètre en laboratoire en l'absence d'échantillons. Ainsi ces observations doivent être prises avec précaution. On notera par exemple, que :

- le maximum de concentration du forage F9bis est inférieur à 1 ppb, soit juste à la limite de détection des appareils ;
- les multi-pics observés sur le F5 peuvent être provoqués par une augmentation du débit à la suite de précipitations (pouvant aussi être à l'origine d'un signal turbide perturbant la restitution du traceur) ;
- la sonde du F6 a été perturbée par différents problèmes techniques induisant un décalage important au milieu de la remontée de concentration du traceur.

Cependant, ces courbes étant des observations originales et uniques jusqu'à présent non observées du fait du contexte particulier de la source sous-marine de la Vise, nous avons fait le choix de les afficher en proposant des explications (Figure 5, B) qui supposent que ces signaux traduisent bien la restitution du traceur.

Pour le F9bis, on observerait une restitution assez précoce débutant environ 7 jours après l'injection et atteignant son maximum 9 jours après injection. Le pic est très étalé avec une concentration inférieure à 1 ppb.

Pour le F5 (forage proche de F9bis, environ 300 m à l'Est de la source), la restitution débiterait environ 13 jours après l'injection et se présente sous forme de multi-pics (maximum de concentration environ 2 ppb, 16 jours après injection).

Pour le F6 situé à 400 m au Nord-Est de la source, le signal du fluorimètre a été perturbé par différentes problèmes techniques. Le pic débutant autour du 12/02 et culminant les 15 et 16 jours après l'injection semble néanmoins crédible.

Les débits de pompage avaient été bridés pendant l'inversac : 4 m³/h pour F5, 10 m³/h pour F6 et du même ordre de grandeur pour F9bis. Compte tenu de ces valeurs les quantités restituées sont très faibles, soit moins de 2g par forage, ce qui correspond à des taux de restitution infime, de l'ordre de 0,001 (1 pour mille).

Ainsi ces observations permettent de conclure qu'il existerait une relation hydraulique entre la source de la Vise et les forages hydrothermaux, mais que celle-ci concerne des volumes d'eau extrêmement faibles.

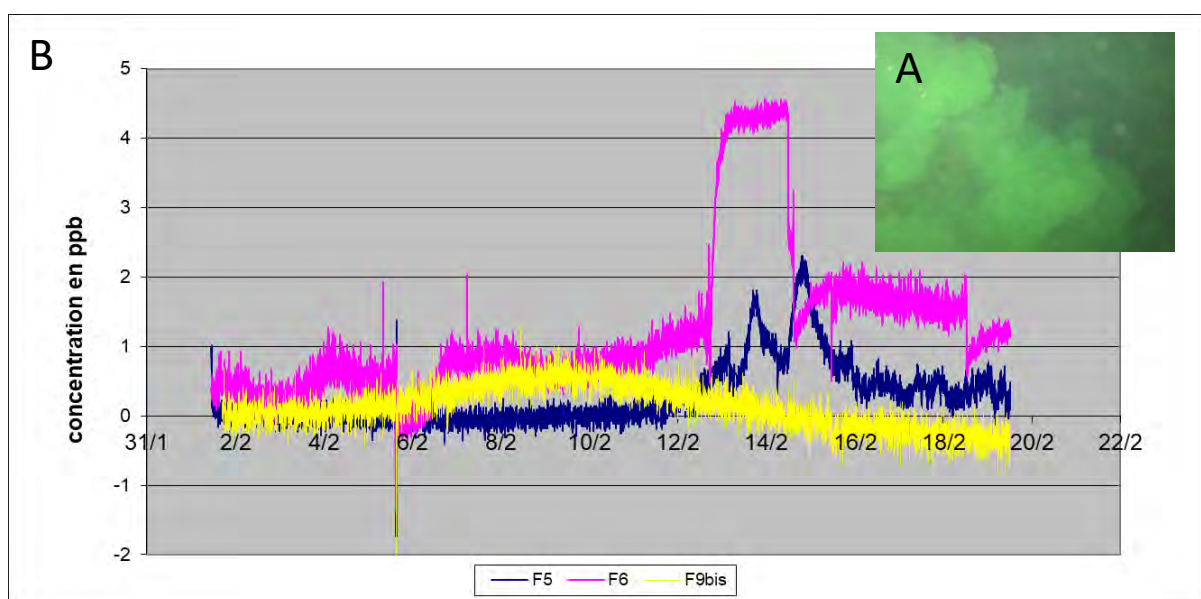


Figure 5 : A : Photographie du traceur à la source sous-marine de la Vise. B : Concentration en ppb de la fluorescéine dans les 3 forages hydrothermaux de Balaruc les Bains (F5, F6 et F9bis).

3. Traçages artificiels et variabilité hydrologique sur le système Vène - Issanka

3.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE ET GÉOLOGIQUE

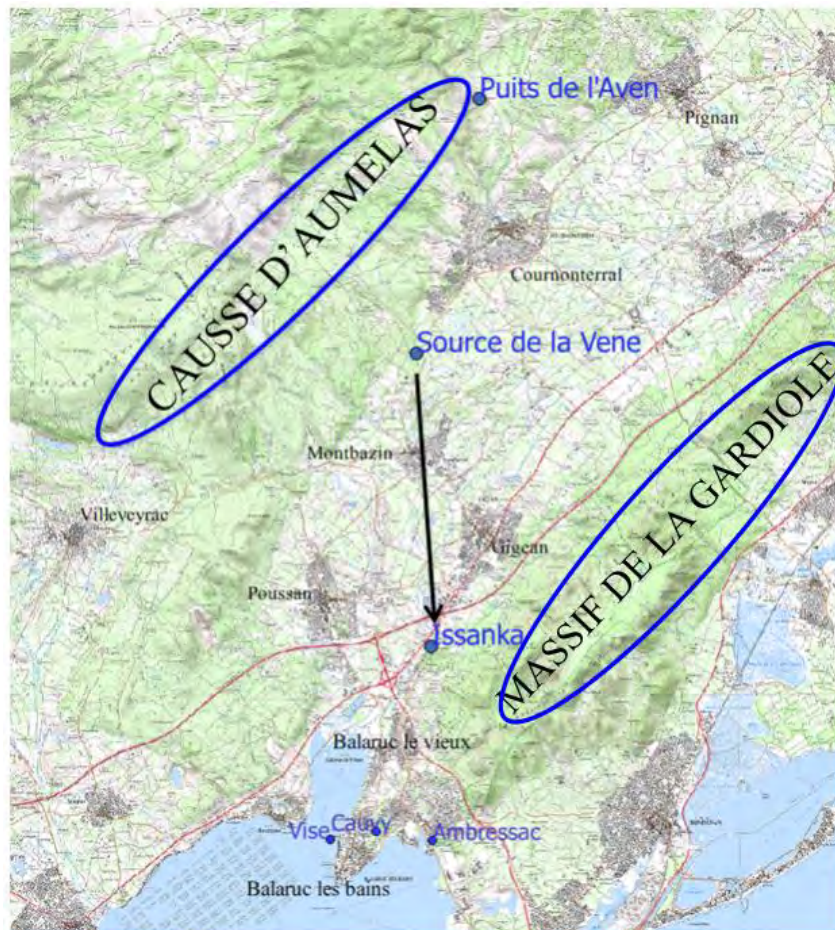


Figure 6 : Carte topographique du site d'étude du système-traçage source de la Vène – Issanka. En bleu, le nom des différentes sources, dont celles de Cauvy et Ambressac de la presqu'île de Balaruc les Bains et la source sous-marine de la Vise.

Le site d'étude – le système Vène – Issanka - se situe entre le Causse d'Aumelas au Nord-Ouest et le massif de la Gardiole au Sud-Est (Figure 6).

Les traçages artificiels, réalisés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, se situent entre la Source de la Vène (n° BSS002JDAT) et Issanka (n° BSS002JDAS pour l'arrivée des eaux des différentes sources au Pavillon de Décharge), dans l'aquifère karstique des calcaires d'âge Jurassique Supérieur, affleurant au niveau du Causse d'Aumelas et du massif de la Gardiole, et étant sous couverture de marno-calcaires mio-pliocènes dans le bassin de Montbazin-Gigean (Figure 6 et Figure 2).

Huit traçages ont été réalisés de juillet 2018 à juillet 2020, à différentes périodes hydrologiques, mais toujours pour des conditions où la source de la Vène ne débordait pas. Les sources d'Issanka, lieu-dit localisé entre Gigean et Balaruc-le-vieux, ont été suivies pour la restitution de tous ces traçages. La source sous-marine de la Vise (n° BSS002JDMR), au niveau de l'étang de Thau, a été suivie seulement lors du dernier traçage de 2020 (Figure 7 et Figure 8).



Figure 7 : Vue sur l'étang de Thau et la source de la Vise depuis Balaruc-les-Bains

La source de la Vise est une source sous-marine située dans l'étang de Thau (Figure 7 et Figure 8). Cette source ressort au niveau d'un gouffre de 28 m de profondeur, là où la profondeur moyenne de l'étang de Thau est d'environ 3 m (Figure 8). On peut la distinguer à la surface par la perturbation qu'elle crée (Figure 7). Elle a fait l'objet d'un aménagement permettant le suivi de plusieurs paramètres hydrodynamiques et physico-chimiques en continu tout au long du projet. Le dispositif de suivi est présenté dans le rapport BRGM-69163-FR (Lamotte, 2019).

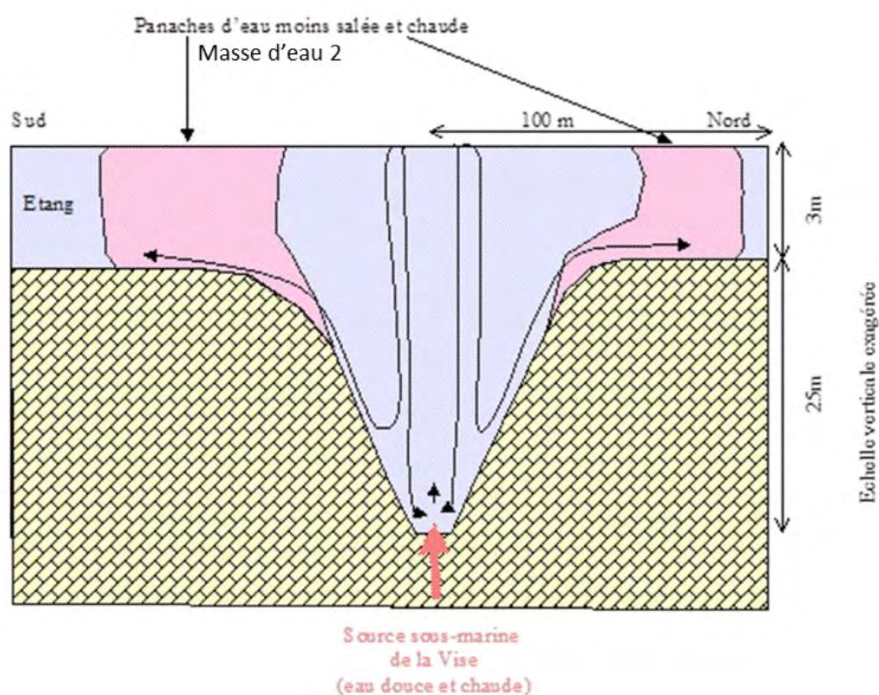


Figure 8 : Schéma conceptuel de l'écoulement au sein et au voisinage du gouffre de la source de la Vise (figure issue du rapport BRGM/RP-50787-FR)

3.2. MODALITÉS D'INJECTION ET DE RESTITUTION DES DIFFÉRENTS TRAÇAGES

3.2.1. Modalités d'injection

Le point d'injection des traceurs est la source de la Vène ([BSS002JDAT](#)) au niveau du puits métallique aménagé ([BSS002JCWK](#)), situé près de Cournonsec (Figure 6). Il s'agit d'un puits à ciel ouvert réalisé en 1973 d'environ 1 m de diamètre foré jusqu'à 35.6 m de profondeur. Les injections sont réalisées à l'aide d'une pompe hydrostatique reliée à un tuyau d'une trentaine de mètres de long que l'on insère dans le puits, permettant d'atteindre la profondeur du niveau d'eau (Figure 9). La référence de mesure du niveau piézométrique a été nivelée dans le cadre du projet à 40.847 mNGF pour ce puits – cette valeur diffère de la référence utilisée dans les études précédentes. Cette mesure piézométrique permet de connaître la charge hydraulique dans le conduit karstique de la source de la Vène.

Toutes les injections ont été réalisées avec 2 kg de fluorescéïne suivie d'un volume de chasse de l'ordre de 100 litres d'eau (Figure 10a).

Une reconnaissance par caméra le 17/05/2018 a permis de localiser une zone crépinée à partir de 28.65 m de profondeur, puis une fin de tubage à 33.81 m, laissant apparaître la paroi nue sur quelques cm, puis le fond où une cavité et des éboulis sont identifiés vers 34 m de profondeur. Le courant semble plus fort face à cette cavité. Les traceurs ont donc été injectés au fond du puits à l'aide d'un tuyau.



Figure 9 : Opération d'injection du traceur « Fluorescéïne » à la source de la Vène, selon un protocole reproduit à l'identique lors des différents essais de traçages du projet.

De 2018 à 2020, huit injections ont été réalisées selon un protocole identique, ceci à différentes périodes hydrologiques. Dans la suite de cette étude, on utilisera un gradient de couleur afin de symboliser les conditions hydrologiques de chacun des traçages, ces conditions pouvant être quantifiées précisément par la profondeur du niveau d'eau de la source allant de -6 m à -32 m (Tableau 3).

Ces différentes conditions hydrologiques d'injection, peuvent être également visualisées sur la série temporelle du niveau piézométrique mesurée dans un forage localisé à une 30^{aine} de mètres de la source (piézomètre BSS002JDBC (10162X0226/V)), dont la référence de mesure piézométrique a été nivelée à 42.867 mNGF dans le cadre du projet. Le puits d'injection au niveau de la source de la Vène a été nivelé à une altitude de 40,847 mNGF. Ainsi, sur la Figure 10b, représentant les niveaux d'eau enregistrés entre juillet 2018 et juillet 2020 à ce forage, les différentes périodes d'injection sont représentées par des points colorés dont la légende de couleur est quantifiée par les valeurs de profondeurs d'eau à la source de la Vène sur le Tableau 3.

La source de la Vène déborde lorsque le niveau d'eau mesuré sur le piézomètre BSS002JDBC est supérieur à 38 mNGF (environ -5 m par rapport au puits d'injection), ce qui se traduit par une rupture de pente et une phase de transition 1 sur la Figure 10b. Pendant les périodes de décrue des niveaux d'eau, on observe également une autre rupture de pente du niveau d'eau (marquée par une transition 2) systématiquement aux alentours de 20 mNGF. On peut supposer qu'à cette altitude, il y ait une modification des circulations d'eau, et que des réseaux karstiques se connectent ou se déconnectent, comme cela a déjà été montré sur d'autres forages de cet aquifère (Bailly-Comte *et al.*, 2008).

Couleur	Profondeur d'eau correspondante (en m)	Période hydrologique
	- 6	Très hautes eaux (THE)
	- 8.8	Hautes eaux (HE)
	- 14.3	
	- 19.2	Moyennes eaux (ME)
	-23.2	
	- 26.6	Basses eaux (BE)
	- 28.55	
	- 32.35	Très basses eaux (TBE)

Tableau 3 : Légende colorée des conditions hydrologiques des différents traçages

Compte tenu de l'altitude de référence pour le puits de mesure du niveau d'eau à la source (40.847 mNGF, utilisé pour l'injection), la zone de transition observée sur le piézomètre BSS002JDBC (10162X0226/V) comprise entre 19 mNGF et 22 mNGF correspond à une profondeur d'eau de -18.847m à -21.847m dans le puits utilisé pour l'injection du traceur.

La multiplication des traçages, à des périodes encadrant cette zone de transition localisée vers 20 mNGF, pourrait sans doute permettre de mieux comprendre et expliquer les différentes circulations d'eau possibles associées à la connexion ou déconnexion de divers réseaux karstiques.

Date d'injection	Numéro du Test	Volume de chasse (m3)	Profondeur d'eau à la source de la Vène (m)	Altitude du niveau d'eau à la source Vène (mNGF)	a)
11/07/2019	Test#1	0.1	-32,35	8,497	
28/03/2019	Test#2	0.1	-28,55	12,297	
11/09/2018	Test#3	0.1	-26,6	14,247	
17/07/2020	Test#4	0.08	-23,2	17,647	
02/07/2020	Test#5	0.08	-19,2	21,647	
17/01/2019	Test#6	0.05	-14,3	26,547	
13/12/2019	Test#7	0.08	-8,8	32,047	
05/07/2018	Test#8	0.1	-6	34,847	

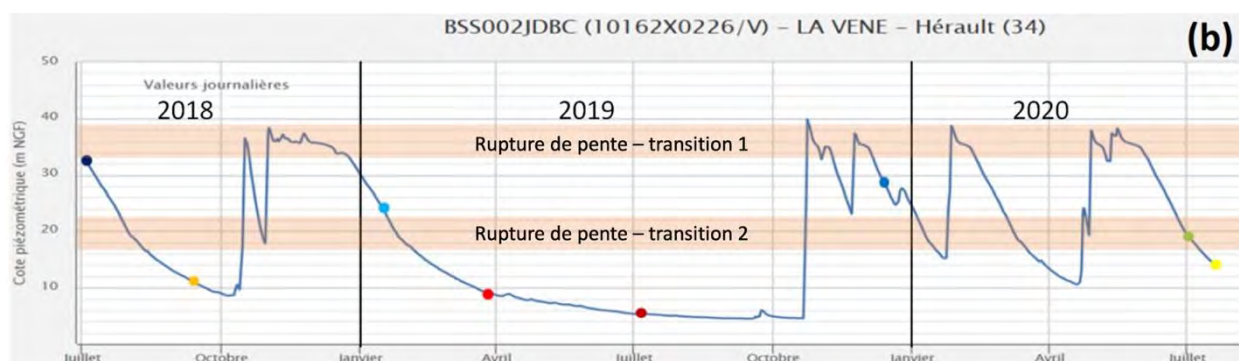


Figure 10 : (a) Caractéristiques des modalités d'injection des traçages réalisés à la source de la Vène entre juillet 2018 et juillet 2020 avec la numérotation des différents tests utilisée dans le Chapitre 4; (b) Evolution des niveaux d'eau à la source de la Vise entre juillet 2018 et juillet 2020 (base de données ADES). Les points colorés correspondent aux différentes périodes d'injection. Des zones de transition (1 et 2) sont marquées par des ruptures de pente, la transition 1 correspond à l'écoulement à la source de la Vène.

3.2.2. Modalités de restitution

Après injection à la source de la Vène, les traceurs sont transportés par les écoulements souterrains naturels, orientés vers le Sud-Est. Une partie de ces écoulements est drainée par les sources d'Issanka d'après les traçages historiques (Tableau 1), et une autre partie continuerait son trajet vers la source de la Vise (Figure 11), bien que cette hypothèse n'ait jamais été prouvée par un traçage artificiel.

Les sources d'Issanka sont localisées dans la plaine alluviale de la Vène, à l'entrée du village d'Issanka. L'eau des sources d'Issanka est issue de drains karstiques du calcaire jurassique, qui constitue le substratum de la nappe alluviale de faible épaisseur, comme on peut le voir avec la source de Bourges de la Figure 12. Ces sources sont captées pour la Ville de Sète, et protégée dans différents « pavillons » : un collecteur permet d'acheminer l'eau vers un pavillon de décharge qui redistribue l'eau vers la Ville de Sète ou la rejette dans la rivière de la Vène pour le volume de « trop plein » (Figure 12).

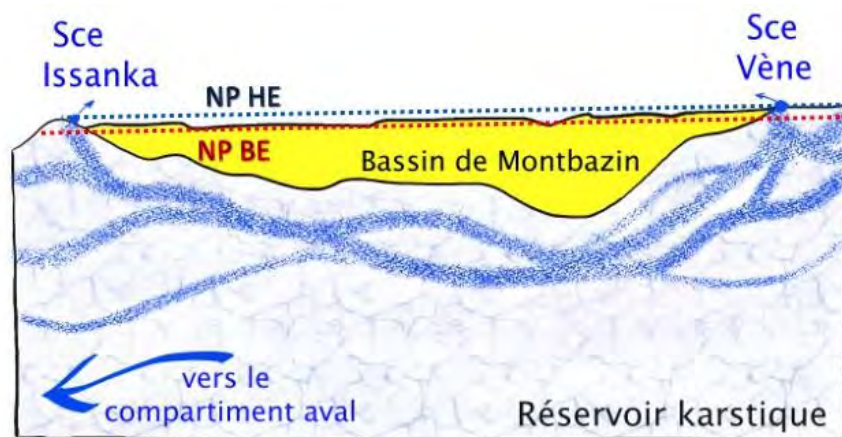


Figure 11 : Coupe schématique du système aquifère d'Issanka et trajets supposés des traceurs injectés depuis la source de la Vène (modifié d'après Hemelsdaël et al. 2021)



Figure 12 : Sources d'Issanka : Installation d'un fluorimètre dans le collecteur des différentes sources d'Issanka, et vues relatives de ce collecteur par rapport à différents pavillons, avec la source du pavillon de Bourges. La canal venturi est localisé en aval des sources, sur la rivière de la Vène.

Les bilans de restitution des différents traçages sont calculés à partir de la chronique de débit « naturalisée » construite dans le cadre de l'étude hydrodynamique (cf. rapport BRGM/RP-71757-FR, livrable L11A, Hakoun et Ladouche 2022) en y ajoutant l'estimation des débits de prélèvements à partir des informations transmises par l'exploitant. Cette dernière information n'est pas disponible à un pas de temps suffisamment fin pour bien décrire la variabilité du débit total pouvant modifier les formes des courbes de restitution, notamment en basses eaux lorsque le régime de prélèvement représente une part significative de l'écoulement total.

La conversion en concentration des données mesurées en mV par les fluorimètres a été réalisée à l'aide de calibration en 2 points selon la méthode proposée par le fabricant. Une correction du bruit de fond a été réalisée selon la méthode proposée par Bailly-Comte *et al.* (2018) afin d'obtenir la meilleure précision possible sur les faibles valeurs, et ainsi bien décrire les effets de traîne.

Afin de tester la meilleure implantation du fluorimètre dans ce champ captant, nous avons dans un premier temps installé plusieurs fluorimètres à différents exutoires (Figure 13) lors du suivi du traçage de janvier-février 2019 :

- la source de Bourges ;
- le collecteur ou regard (dit Mélange) où convergent les flux des différentes sources ;
- la source d'Issanka NORD ;
- la source A.

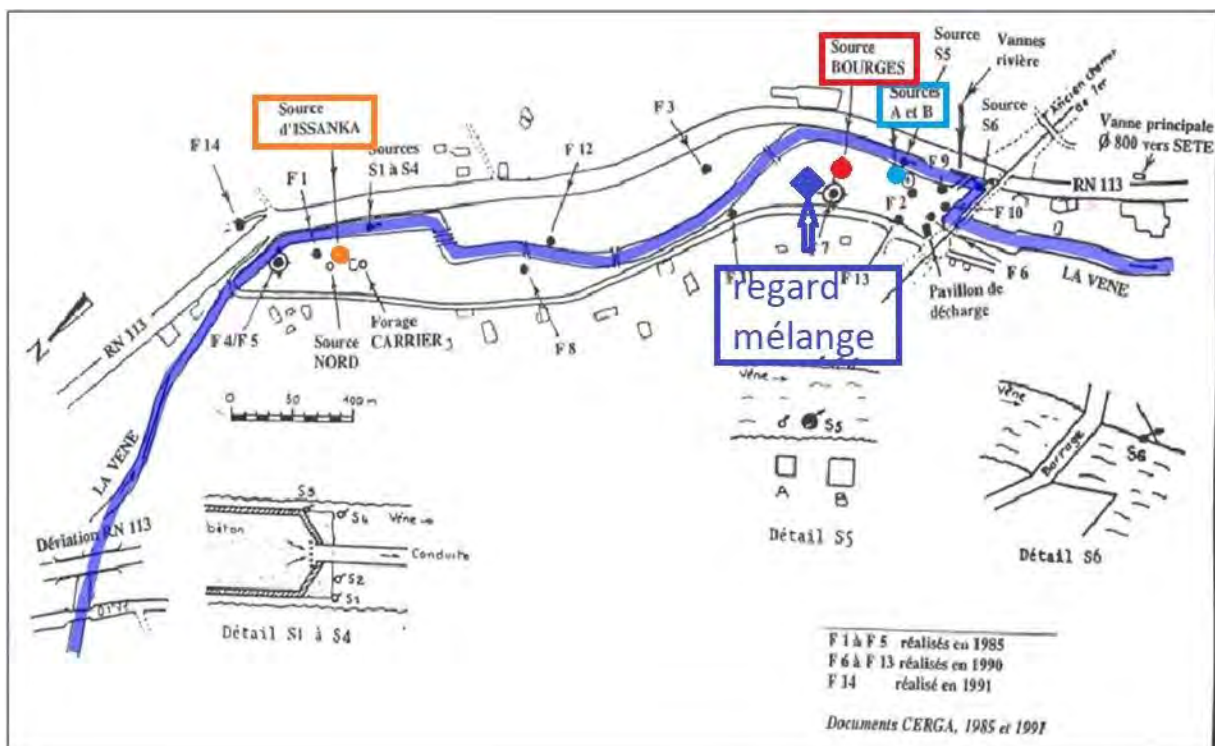


Figure 13 : Plan de localisation du champ captant des sources d'Issanka. Les différents lieux encadrés ont été équipés de fluorimètres pour le 1^{er} traçage afin d'identifier le lieu le plus représentatif.

Les courbes de restitutions obtenues aux points de surveillance « Bourges » et « Mélange » sont superposables en terme d'arrivée, alors que celle d'Issanka Nord arrive un peu avant, et celle de la « Source A » arrive un peu après, le pics de restitution étant décalés d'une dizaine d'heures entre ces deux extrêmes (Figure 13). Ceci s'explique par leur localisation : la source d'Issanka Nord étant en amont des écoulements, alors que la source A est en aval, les 2 autres en position intermédiaire (Figure 13). Les courbes des sources A et Bourges présentent des pics de concentration plus faibles que les autres. Cependant, compte tenu de l'étalement de la restitution plus important, les masses restituées restent assez homogènes d'une source à l'autre. On notera tout de même une masse restituée au « Collecteur – Mélange » plus importante (1429 g), certainement dû au fait que la courbe s'étale un peu plus dans le temps en recevant les arrivées précoces d'Issanka Nord, et tardives de la Source A.

Les masses restituées des différents points de surveillance ont été calculées par bilan de masse sur toute la durée de la restitution à partir du débit estimé pour l'ensemble du système karstique :

$$Mr = \int_0^{+\infty} C(t) * Q(t) dt \quad (\text{Dorfliger 2010})$$

Masses restituées	Issanka NORD	Bourges	Source A	Collecteur Mélange
Masse (g)	1126	1280	1174	1429

Tableau 4 : Bilans de masse des restitutions observées aux 4 points de suivis

Cette expérimentation a permis de démontrer que le positionnement du fluorimètre dans le Collecteur - Mélange où convergent les flux des différentes sources est le lieu le plus adapté à la surveillance des traçages, et qu'il permet de prendre en compte toutes les restitutions issues des différentes sources.

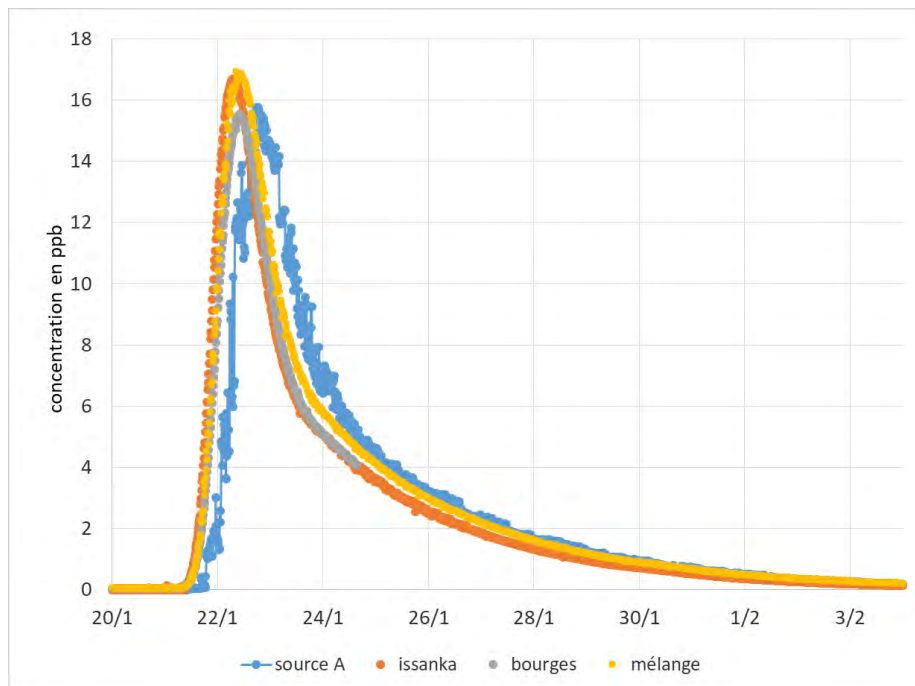


Figure 14 : Courbes de restitution de la concentration en ppb ($\mu\text{g/l}$) de la fluorescéine dans le champ captant des sources d'Issanka (voir plan Figure 3-7).

3.3. OPÉRATIONS DE TRAÇAGES COMPLÉMENTAIRES

La source sous-marine de la Vise a également fait l'objet d'un suivi fluorimétrique lors du dernier essai de traçage du 2 Juillet 2020. Les signaux mesurés n'ont pas permis de confirmer le passage du traceur. Cette absence du traceur à la source de la Vise ne permet pas d'affirmer qu'il n'y ait pas de relation hydraulique avec le système traçage La Vène - Issanka, car la quantité injectée à la source de la Vène est probablement trop faible (2 kg) sachant que l'essentiel du traceur ressort aux sources d'Issanka, et que le débit de la source de la Vise associé à l'augmentation du temps de trajet peut provoquer une forte dilution et dispersion du nuage de traceur : il est ainsi possible que l'on soit sous le seuil de détection des fluorimètres..

Enfin, un traçage à la sulforhodamine a été réalisé sur la presqu'île de Balaruc-les-bains le 06/02/2020 en injectant dans le forage du Cèdre (voir information ci-dessous) et en suivant les sources de Cauvy et d'Ambressac. Un pompage préalable d' 1m^3 d'eau depuis le forage a permis d'injecter les 2 kg de sulforhodamine en « poussant » le traceur. Malheureusement, ce traçage a souffert de défaillances du matériel de suivi (non corrigées en raison du confinement strict du printemps 2020) et aucune information fiable n'a pu en être tirée entre le 06/02/2020 et le 26/02/2020. Les suivis fluorimétriques réalisées à Issanka du 26/02/2020 au 13/05/2020 ne montrent pas de présence de traceur. Les caractéristiques du forage utilisé pour l'injection sont listées ci-dessous :

Fiche : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS003CJNI>

Forage Cèdre nivelé à 47.723 mNGF (haut du tube)

Information issue d'une inspection vidéo : Tubé sur 43 m, ensuite cavité visibles (en eau). Fond atteint par la caméra à 76.06 m (à comparer à 118 m d'après infoterre, donc l'ouvrage est probablement bouché/effondré)

Niveau piézométrique à 42.53 m/ref le 19/09/2018, soit à 5.2 mNGF, puis à 41.03m/ref le 24/10/2019, soit à 6.7m NGF

3.4. ANALYSE DES RÉSULTATS DE RESTITUTION

La courbe obtenue lors du premier essai (test#8 pour les conditions de plus hautes eaux, Figure 10 a) a nécessité de corriger les données d'une dérive (Figure 15), probablement liée à un léger déplacement de la sonde dans le regard dans la partie supérieure mal mélangée.

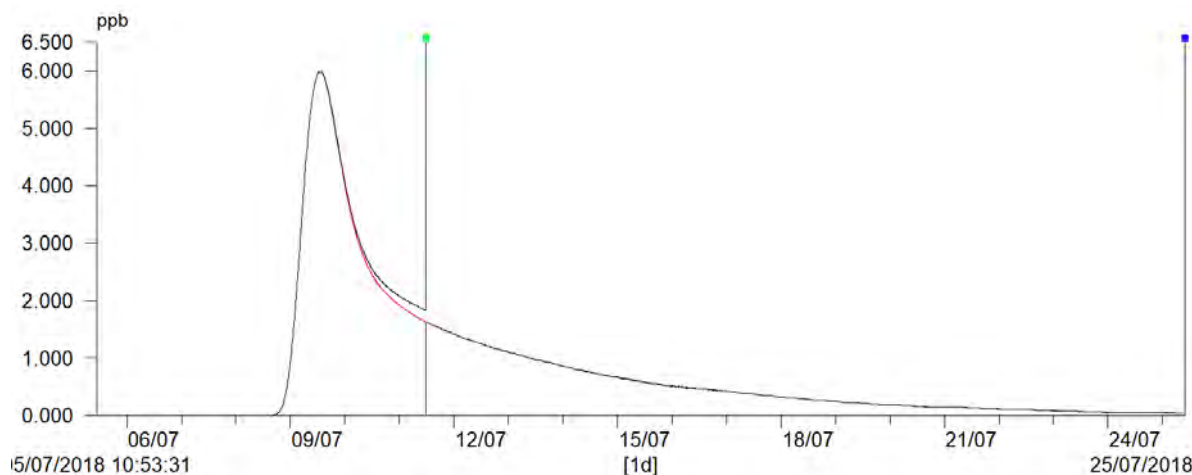


Figure 15 : Correction de dérive lors de la restitution du test#8 le 11/07/2018 à 11:40

Les Figure 17 et Figure 16 représentent les courbes de concentration et les courbes de Distribution de Temps de Séjours (DTS) des 8 traçages de juillet 2018 à juillet 2020 restitués à Issanka, numérotés de 1 à 8 selon les conditions hydrologiques (Tableau 5).

Les courbes DTS correspondent à des courbes de flux massiques normalisées par les masses restituées et peuvent être donc comparées entre elles (Figure 16).

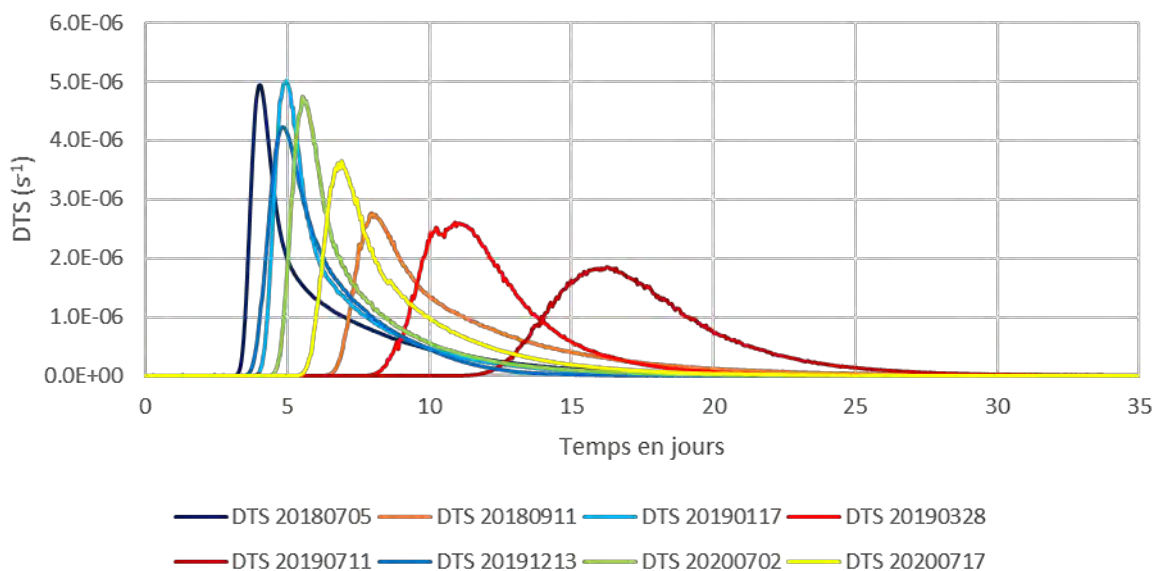


Figure 16 : Courbes de DTS calculées à partir des données de concentration des traçages restitués au niveau de la source d'Issanka et des débits de prélèvement d'eau au niveau du captage de la source d'Issanka

On peut remarquer que la forme de ces courbes de DTS (Figure 16) ou de concentration (Figure 17 A) est très différente selon les conditions hydrologiques : pour les traçages réalisés en hautes eaux (en bleu, vert et jaune), la courbe présente une forte asymétrie entre l'arrivée très rapide et le départ plus lent du traceur, laissant apparaître un pic de concentration très marqué ; tandis que pour les traçages réalisés en basses eaux (en orange et rouge), la courbe possède une allure plus classique, avec une queue de courbe de restitution cohérente avec la vitesse d'arrivée du traceur. La représentation semi-logarithmique (Figure 17 B) montre que toutes les courbes de concentration présentent une évolution asymptotique exponentielle, avec une pente comparable d'une courbe à l'autre.

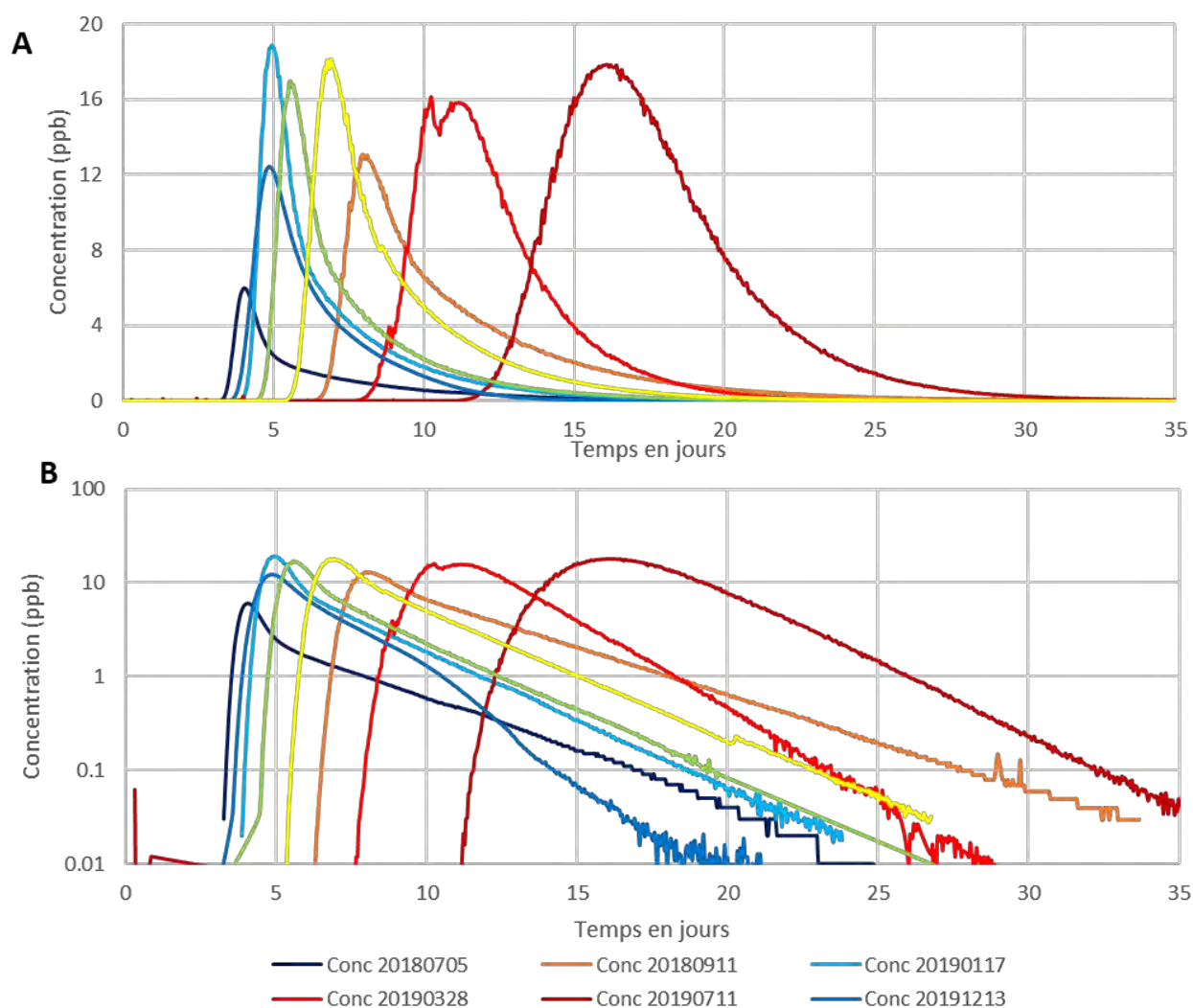


Figure 17 : Courbes de concentration des traçages restitués au niveau des sources d'Issanka, représentation linéaire (A) et semi-logarithmique (B).

Le tableau suivant présente les résultats obtenus à partir de l'analyse graphique des courbes de restitutions et des calculs de bilan de restitution. Les 8 essais de traçage y sont numérotés suivant les conditions hydrologiques, Test#1 étant le traçage réalisé dans les conditions de plus basses eaux, jusqu'à Test#8 pour les conditions de plus hautes eaux. Le débit moyen renseigné correspond au débit constant calculé permettant d'obtenir le même taux de restitution qu'avec le débit variable pour chaque traçage. Il correspond au débit constant qui sera utilisé dans l'application de solution analytique supposant un régime permanent.

Dans ce Tableau 5, les premières caractéristiques observables de la restitution des traceurs sont détaillées pour chacun des cas étudiés. On peut ainsi visualiser l'évolution des paramètres de débits, de temps d'arrivée et de taux de restitution (R%) en fonction de la profondeur pour chaque traçage.

Id	Date	Q (l/s)	R(%)	Prof. source de la Vène	Niveau piézométrique à la source de la Vène (mNGF)	Temps d'apparition du traceur (h)	Temps du pic (h)
Test#8	05/07/2018	336	21%	-6.00	34.85	96	98
Test#7	13/12/2019	261	38%	-8.80	32.05	85	117
Test#6	17/01/2019	278	53%	-14.30	26.55	92	114
Test#5	02/07/2020	205	39%	-19.20	21.65	108	108
Test#4	17/07/2020	159	40%	-23.20	17.65	127	127
Test#3	11/09/2018	158	39%	-26.60	14.25	154	200
Test#2	28/03/2019	145	46%	-28.55	12.30	186	240/260
Test#1	11/07/2019	67	33%	-32.35	8.50	270	385

Tableau 5 : Synthèse des données de restitution des traçages

Les temps d'arrivée du traceur et d'atteinte du pic de concentration augmentent progressivement plus le niveau est bas (Figure 18).

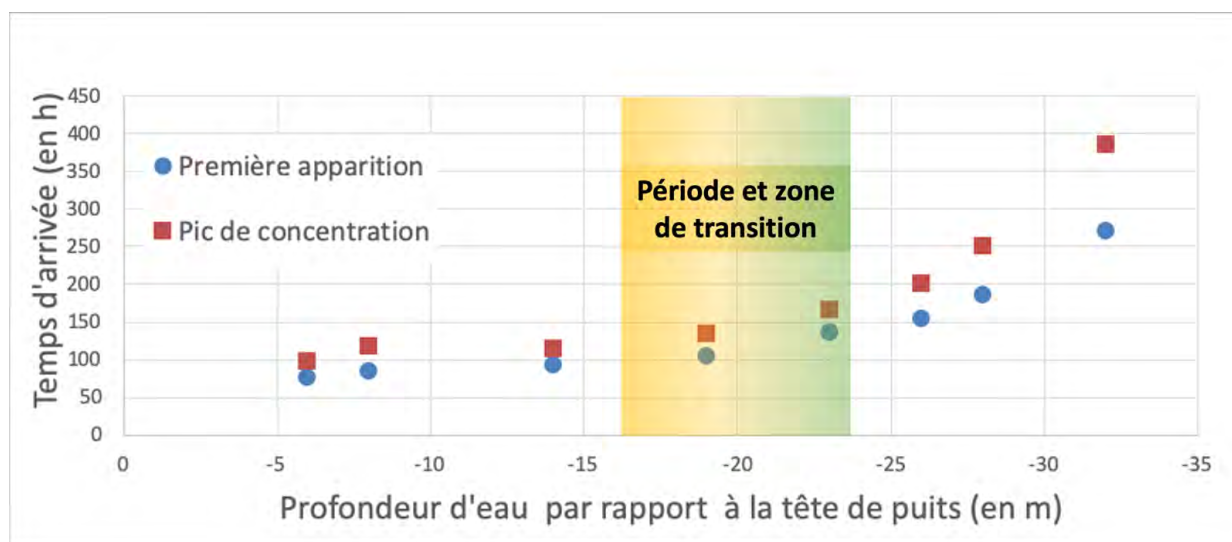


Figure 18 : Temps de première apparition et d'atteinte du pic de concentration de chaque traçage en fonction de la profondeur du niveau d'eau au moment de l'injection

Deux pentes de tendance peuvent néanmoins être distinguées : une première faible, quasiment constante entre -6 et -19 m, l'autre à partir de -23 m, plus forte. L'écart entre ces deux temps d'arrivée a également tendance à augmenter dès -23 m. Il semblerait y avoir une zone de transition entre ces deux tendances, une profondeur à partir de laquelle le changement entre les deux pentes s'opère.

On observe également une très bonne cohérence des conditions hydrologiques en comparant les niveaux d'eau lors de l'injection à la source de la Vène et les débits à cette même date pour l'ensemble des sources d'Issanka (Figure 19). Cette figure identifie bien la répartition des traçages selon des conditions hydrologiques allant de moyennes-hautes eaux à très basses eaux. Ceci permet d'utiliser la profondeur mesurée à la source de la Vène comme indicateur des conditions hydrologiques dans l'ensemble du système karstique d'Issanka pour l'interprétation des résultats.

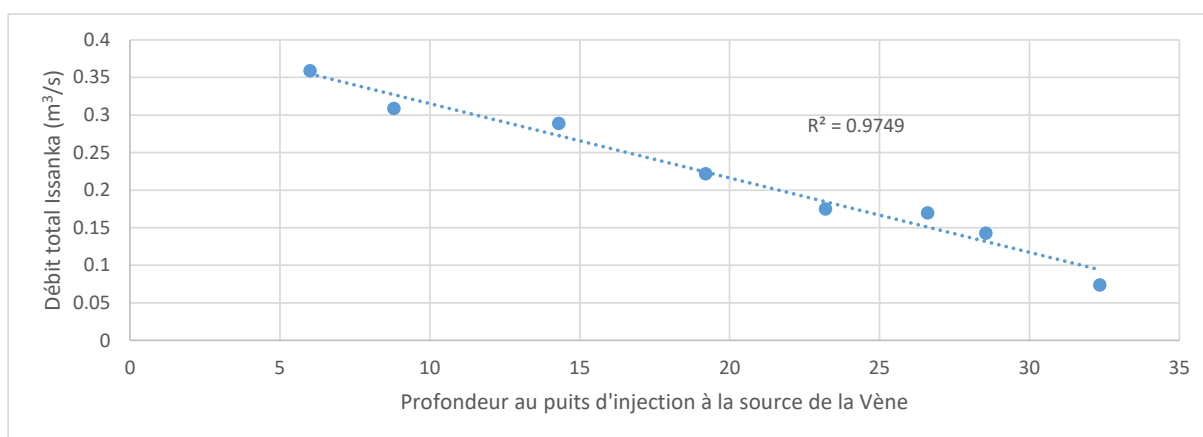


Figure 19 : Relation linéaire entre les débits aux sources d'Issanka et les hauteurs d'eau à la source de la Vène (R^2 : coefficient de corrélation de la droite de régression linéaire)

La Figure 20 présente l'évolution des taux de restitution calculés pour les 8 traçages en fonction de la profondeur de l'eau lors de l'injection, en utilisant le code couleur relatif aux conditions hydrologiques (Tableau 3).

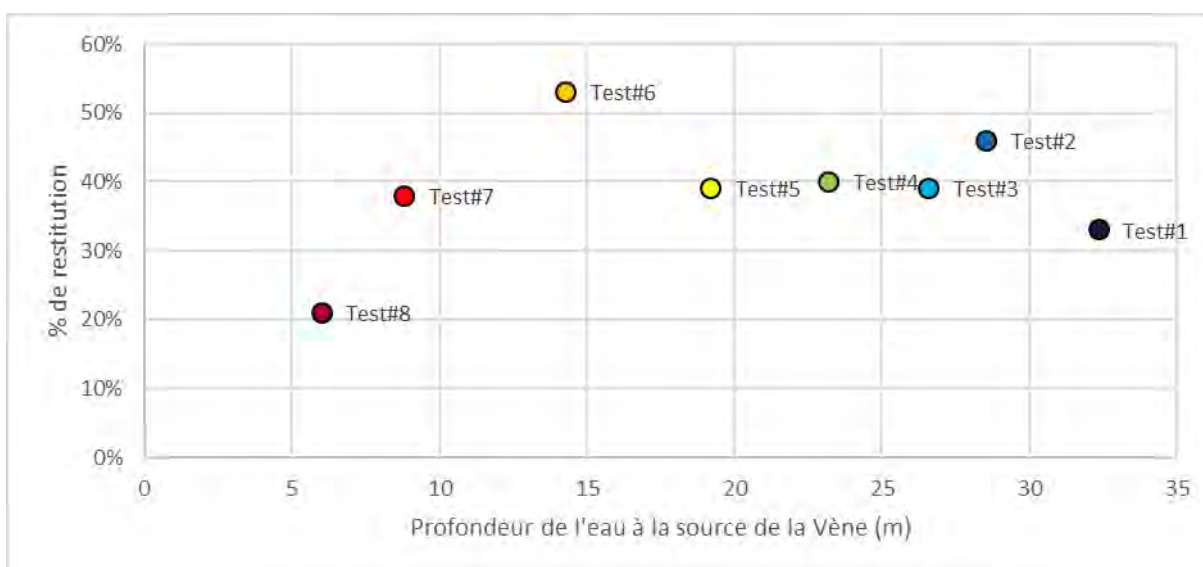


Figure 20 : Taux de restitution en fonction de la profondeur d'injection (Numéro des tests : voir Tableau 5). Tableau 5 : Synthèse des données de restitution des traçages

Les taux de restitutions calculés sont compris entre 21 et 53 % (Figure 20 et Tableau 5). D'une manière générale, une incertitude de ± 5 % est à prendre en compte sur l'estimation des concentrations, à laquelle il faut ajouter une incertitude de l'ordre de 10 à 20 % sur les débits. Ces valeurs sont plutôt faibles et ne peuvent pas s'expliquer uniquement par les incertitudes sur le débit ou des phénomènes de dégradation du traceur. Ceci suggère qu'une partie du traceur poursuit son chemin en profondeur, probablement vers le compartiment aval (Figure 1).

Le taux calculé pour le traçage réalisé à -6 m (Test#8) a été évalué à 21% mais ce taux est très probablement sous-estimé à cause d'un problème de positionnement du fluorimètre dans le regard de mélange. Le fluorimètre était positionné plus bas et toujours à la même position pour tous les autres essais ; ceci peut expliquer un biais sur les concentrations mesurées lors du test#8. Par ailleurs, la courbe de concentration obtenue pour le test#8 est la seule courbe qui a nécessité la correction d'une dérive du capteur au cours de la restitution, ce qui augmente l'incertitude du taux de restitution pour ce point.

En ce qui concerne le traçage réalisé à -14 m (Test#6), le taux de restitution semble anormalement élevé en comparaison avec les autres traçages (53 %) : nous n'avons malheureusement pas pu le refaire pour vérifier si ce taux est répétable, car les conditions identiques ne se sont pas reproduites pendant la durée de ce projet :

- si ce taux est fiable, alors nous aurions une augmentation du taux jusqu'à une zone de transition, repérée également sur la Figure 10 ;
- si ce taux n'est pas fiable, et que nous ne prenons pas en compte cette valeur, alors nous avons des taux stables, quelles que soient les conditions hydrologiques, de l'ordre de 40 %.

En conclusion, les modalités d'injection et de restitution sont les mêmes pour chacun des traçages, seule la période hydrologique choisie change. La différence de hauteur d'eau initiale dans le puits est un indice de conditions de circulation et de restitution différentes du traceur à Issanka : plus le niveau est bas, plus la restitution sera étalée dans le temps et plus elle arrivera tardivement. Les courbes des DTS de la Figure 16 mettent également en évidence, de manière plus flagrante, ce changement de régime progressif. On s'interroge alors sur le rôle de ce contexte hydrologique sur la circulation du traceur dans le milieu traversé. Dans le chapitre suivant, la modélisation de ces courbes DTS ou de concentration de la restitution va permettre de tester différents scénarios de circulation et proposer des modalités de fonctionnement hydrogéologique entre le compartiment amont du Causse d'Aumelas et le compartiment aval des sources d'Issanka (Figure 1).

4. Interprétation des propriétés hydrodispersives et modèle conceptuel d'écoulement

4.1. OBJECTIFS

Huit courbes de restitutions ont été obtenues sur le système traçage Vène-Issanka pour des conditions hydrologiques différentes, mais des conditions proches du régime permanent durant chaque essai. Les courbes obtenues présentent des caractéristiques atypiques, avec une très forte dissymétrie en hautes eaux. L'objectif de cette section est de tenter de reproduire par un modèle numérique, le plus simple possible, l'ensemble de ces courbes pour mieux comprendre l'origine de cette dissymétrie et permettre ainsi de mieux contraindre le modèle conceptuel d'écoulement des eaux entre les compartiments amont et aval du système karstique d'Aumelas-Thau.

4.2. CHOIX DES MODÈLES ANALYTIQUES

Il existe de nombreuses solutions analytiques qui rendent compte des processus de transfert dans un milieu poreux. À une échelle macroscopique telle que celle du système traçage Vène-Issanka, les phénomènes de transport sont communément décrits à l'aide de l'équation de transport pour rendre compte des processus advectif et dispersif.

L'approche la plus simple représente ce transport selon un écoulement mono-dimensionnel. Dans le cas d'un système karstique où l'injection a lieu directement dans le système de drainage, comme lors des injections réalisées depuis le conduit karstique alimentant la source de la Vène, le milieu peut être considéré comme un simple conduit reliant le point d'injection au point de restitution, ce qui permet de s'affranchir de la notion de porosité cinématique (Bailly-Comte et Pistre, 2021).

Dans le cas d'un écoulement advectif-dispersif mono-dimensionnel en régime permanent, Kreft et Zuber (1978) montrent que 4 solutions analytiques peuvent être utilisées pour reproduire la courbe de restitution d'un traceur en réponse à une injection instantanée. Parmi ces solutions, celle qui exprime la concentration sous la forme d'une concentration de flux aux points d'injection et de restitution est celle qui est la plus adaptée aux conditions de réalisation et de suivi d'un traçage artificiel (Zuber, 1986). Cette solution analytique est utilisée pour décrire un premier modèle 1D de transfert selon un unique chemin d'écoulement. Le modèle correspondant est appelé modèle dispersif dans la littérature et est noté DM (Eq. 1) :

$$DM(t) = \frac{Q}{m} \frac{1}{t \sqrt{\frac{4\pi t}{t_{adv} Pe}}} e^{-\frac{t_{adv} Pe}{4t} \left(1 - \frac{t}{t_{adv}}\right)^2} \quad (1)$$

Avec Pe [-] le nombre de Péclet macroscopique, t_{adv} [s] le temps caractéristique d'advection égal au rapport entre la distance parcourue depuis le point d'injection et la vitesse d'écoulement (constante), Q [m³/s] le débit (constant) et m [kg] la masse de traceur restituée.

À partir de ce modèle, il est possible d'imaginer un transfert selon plusieurs chemins d'écoulements, d'abord divergent depuis le point d'injection puis convergent vers le point de restitution. Chaque chemin d'écoulement est caractérisé par un nombre de Péclet et un temps d'advection spécifique, et la solution s'obtient par combinaison linéaire des contributions de chaque chemin. Cette famille de modèles dispersifs à chemins multiples est appelée MDM

(Bodin, 2020). Le cas le plus simple correspond à l'utilisation de 2 chemins et nécessitant un coefficient de répartition (compris entre 0 et 1) entre les 2 chemins, noté a_1 , et représentant ici le % du flux de traceur empruntant le premier chemin. Le modèle correspondant est appelé 2DM (Eq. 2) :

$$2DM(t) = a_1 DM_1(t) + (1 - a_1) DM_2(t) \quad (2)$$

avec

$$DM_i(t) = \frac{Q}{m} \frac{1}{t \sqrt{\frac{4\pi t}{t_{adv_i} Pe_i}}} e^{-\frac{t_{adv_i} Pe_i}{4t} \left(1 - \frac{t}{t_{adv_i}}\right)^2} \quad (3)$$

Ce modèle à 2 chemins permet dans le cas d'un système de drainage karstique d'envisager un transfert selon 2 réseaux karstiques, l'un pouvant être inactif en basses eaux. Le débit Q et le taux de restitution étant considérés connus pour le calcul de la masse restituée m , ce modèle nécessite le calage de **5 paramètres** (Figure 21).

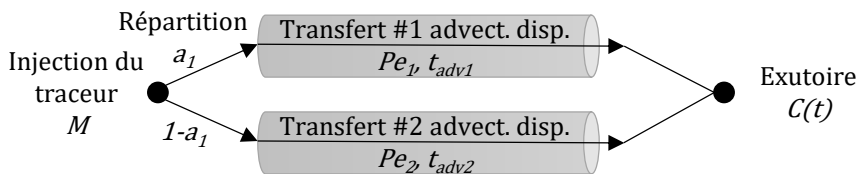


Figure 21 : Schéma conceptuel du modèle 2DM (avec Pe [-] : nombre de Péclet, t_{adv} [s] : le temps caractéristique d'advection ; a_1 [-] : le coefficient de partage ; $C(t)$ [$\mu\text{g/l}$] : la concentration du traceur au cours du temps et M [kg] : la masse du traceur injectée)

De nombreuses études ont cependant montré que les modèles dispersifs n'étaient pas toujours adaptés à la simulation des courbes de restitution des traceurs, notamment pour la reproduction des effets de traîne observés sur la fin des courbes de restitution. Ce phénomène est le plus souvent attribué aux hétérogénéités de vitesses et aux interactions avec des zones d'eau morte ou moins mobiles. Dans le cas des aquifères karstiques, Hauns *et al.* (2001) montrent que la dissymétrie des courbes de restitution est contrôlée par la présence de cavités où le traceur est temporairement stocké. Si ces conclusions proviennent d'observations sur un écoulement à surface libre dans la zone d'infiltration, l'effet de rétention dans les cavités est également envisageable dans le cas de circulations dans un réseau karstique saturé dans la zone noyée.

Ainsi, une nouvelle approche simplifiée du transport dans un réseau karstique présentant une cavité est proposée : une partie du traceur est ici susceptible de rejoindre un réservoir de stockage temporaire représenté par un réacteur parfaitement mélangé, dont la distribution des temps de séjour est donnée par le modèle exponentiel. Ce réacteur parfaitement mélangé reproduit l'effet combiné de tous les élargissements et autres cavités que va rencontrer le nuage de traceur avant d'atteindre l'exutoire.

La fonction de transfert du réacteur parfaitement mélangé est déterminée à partir d'un seul paramètre T_{exp} [j] relatif au temps de séjour du traceur dans le réservoir. Elle est donnée par la fonction $g(t)$ dans l'équation suivante (4) :

$$g(t) = \frac{1}{T} e^{-t/T_{exp}} \quad (4)$$

Le modèle résultant est appelé EDM. Il correspond à la mise en série du modèle DM (un seul chemin) avec un modèle représentatif de la rétention du traceur dans un réservoir parfaitement mélangé selon une fonction de transfert exponentielle (modèle EM). Un paramètre supplémentaire de répartition du flux de traceur a_{DM} permet de court-circuiter le phénomène de stockage temporaire. Ainsi, pour un coefficient a_{DM} de 100 %, il n'y a pas de rétention du traceur et la solution analytique correspond à celle du modèle DM, tandis que pour $a_{DM}=0$ tout le traceur sera concerné par ce phénomène de rétention.

La figure suivante illustre par un schéma conceptuel le fonctionnement du modèle EDM à 4 paramètres (Figure 22).

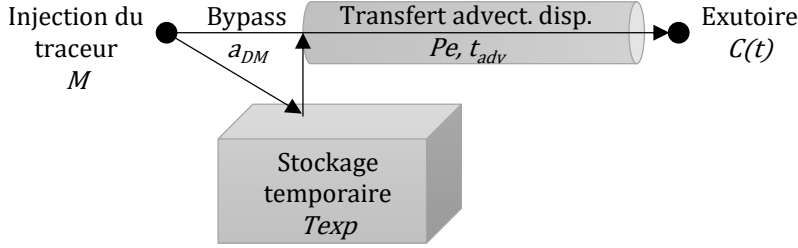


Figure 22 : Schéma conceptuel du modèle EDM (avec Pe [-] : nombre de Péclet, t_{adv} [s] : le temps caractéristique d'advection ; a_{DM} [-] : le coefficient de répartition du flux (by-pass) ; $C(t)$ [$\mu\text{g/l}$] : la concentration du traceur au cours du temps et M [kg] : la masse du traceur injectée)

Ce modèle est ici utilisé pour tenter de prendre en compte l'effet de rétention du traceur dans les cavités karstiques. Il nécessite le calage de **4 paramètres**, soit un de moins que le modèle 2DM.

La solution analytique du modèle EDM est donnée par :

$$EDM(t) = a_{DM}DM(t) + (1 - a_{DM})EDM_0(t) \quad (5)$$

Où $EDM_0(t)$, qui est égal à $EDM(t)$ pour $a_{DM}=0$ est adapté de Marino (1974) :

$$EDM_0(t) = \frac{Q}{m} \frac{e^{-t/T}}{2T} \times \left\{ \begin{aligned} &e^{\frac{Pe(1-\gamma t_{adv})}{2}} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{Pet_{adv}}{4t}} (1 - \gamma t) \right) \\ &+ e^{\frac{Pe(1+\gamma t_{adv})}{2}} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{Pet_{adv}}{4t}} (1 + \gamma t) \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{où } \gamma = \frac{1}{t_{adv}} \sqrt{1 - \frac{4t_{adv}}{TPe}} \quad (7)$$

et $DM(t)$ est le modèle dispersif à un seul chemin donné par :

$$DM(t) = \frac{Q}{m} \frac{1}{t \sqrt{\frac{4\pi t}{t_{adv}Pe}}} e^{-\frac{t_{adv}Pe}{4t} \left(1 - \frac{t}{t_{adv}}\right)^2} \quad (8)$$

4.4. RÉSULTATS

Les solutions analytiques des modèles 2DM et EDM ont été écrites dans le fichier *MesFormules.ini* du logiciel TRAC v1.6.9 disponible au téléchargement sur le site du BRGM (<https://www.brgm.fr/fr/logiciel/trac-outil-aide-interpretation-tracages-milieus-poreux>, Gutierrez *et al.*, 2012, 2013). Les figures suivantes présentent les résultats obtenus pour les 8 essais de traçage lors du calage automatique des solutions. Une optimisation est réalisée sur l'ensemble des données pour maximiser le critère de Nash calculé entre les données observées et simulées.

4.4.1. Résultats graphiques du modèle dispersif avec 2 chemins d'écoulement (2DM)

Sur les graphiques de la Figure 23, les points noirs correspondent aux observations et la courbe rouge correspond au résultat du modèle 2DM. Cette courbe rouge résulte de la somme des deux modèles de transfert dispersifs, l'un plus rapide représenté par une courbe discontinue orange et l'autre plus lent par une courbe discontinue verte. Une courbe grise est également ajoutée pour le test#1 pour représenter la solution du modèle DM simple (un seul chemin), car le résultat obtenu pour cet essai reste satisfaisant en considérant ce modèle n'utilisant que 2 paramètres.

4.4.2. Résultats graphiques du modèle dispersif avec stockage temporaire du traceur (EDM)

Sur les graphiques de la Figure 24, les points noirs correspondent aux mesures, la courbe rouge correspond au résultat du modèle EDM et la courbe discontinue orange représente les résultats théoriques qui auraient été obtenus sans considérer l'effet de stockage temporaire. La comparaison des 2 courbes permet d'illustrer l'influence d'un stockage temporaire partiel (total si $a_{DM}=100\%$) du traceur sur le temps d'arrivée et la valeur du pic de concentration. Sans cet effet, les concentrations maximales observées seraient donc plus fortes et dépasseraient 30 ppb à plusieurs reprises.

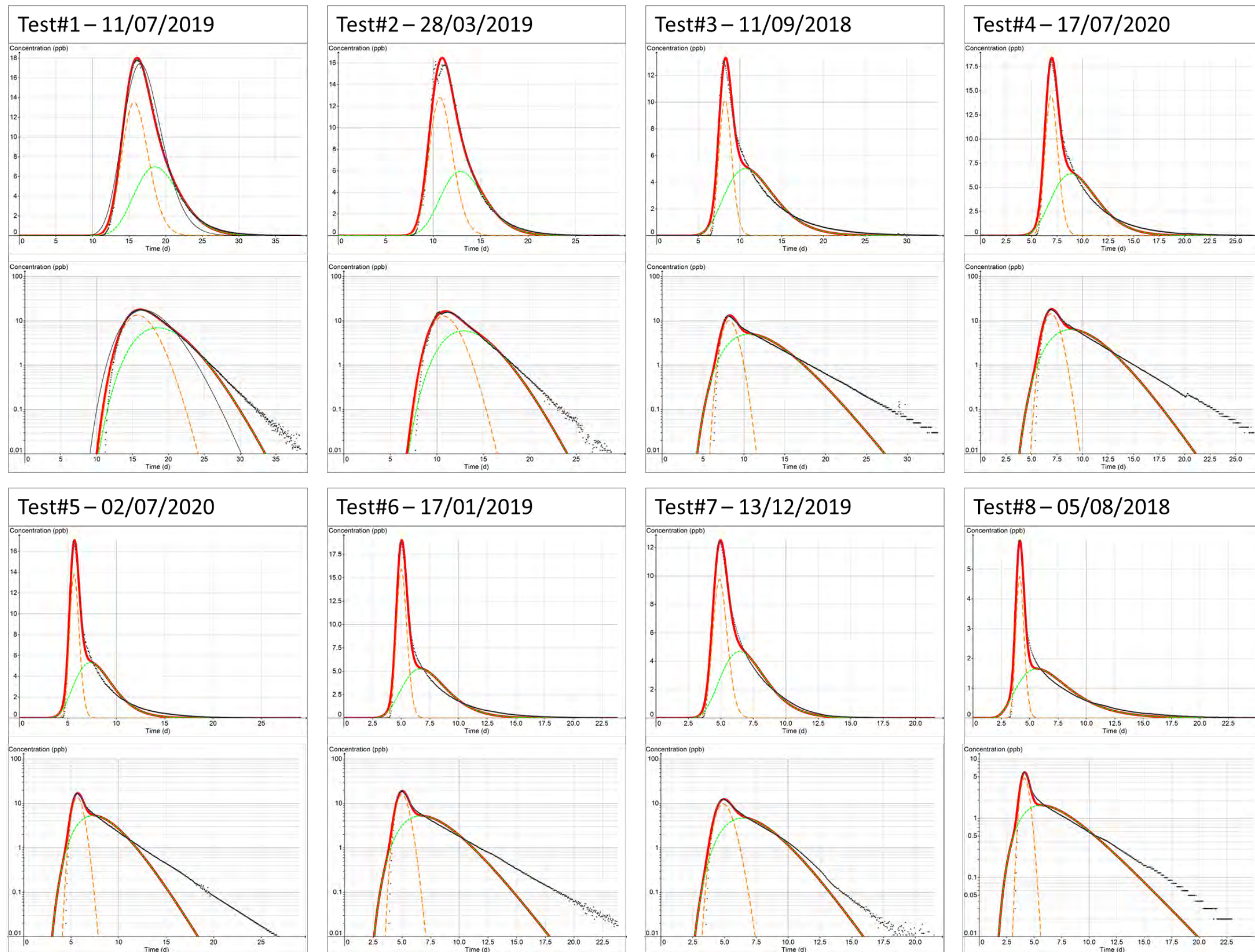


Figure 23 : Résultats du calage du modèle 2DM pour les 8 essais en coordonnées linéaires (en haut) et semi-log (en bas). Légende : Points noirs : Concentration mesurée ; Courbe rouge : simulation par le modèle 2DM ; Courbe discontinue orange : transfert DM rapide ; Courbe discontinue verte : transfert DM lent

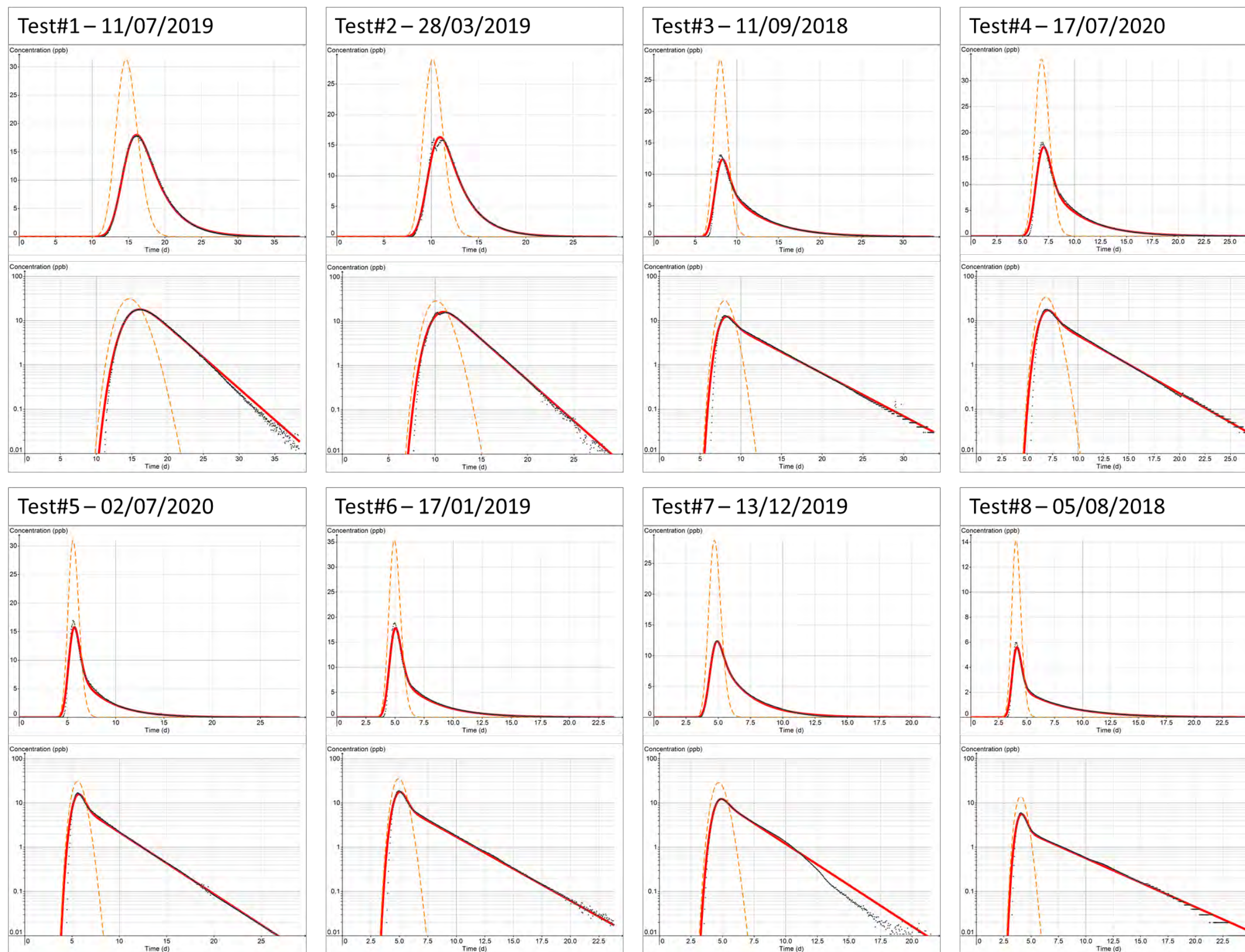


Figure 24 : Résultats du calage du modèle EDM pour les 8 essais en coordonnées linéaires (en haut) et semi-log (en bas). Légende : Points noirs : Concentration mesurée ; Courbe rouge : simulation par le modèle EDM ; Courbe discontinue orange : transfert DM correspondant sans considérer le stockage temporaire

4.4.3. Paramètres et efficacité des modèles

Les paramètres utilisés pour le calage des modèles 2DM et EDM sont reportés dans le tableau suivant, qui précise également la qualité des simulations obtenues à travers le critère de Nash, ainsi que les valeurs des paramètres fixés communs aux 2 modèles, à savoir le taux de restitution R et le débit Q. La deuxième ligne pour le Test#1 donne les paramètres obtenus en ne supposant qu'un seul chemin (modèle DM).

Chaque transfert décrit selon un modèle DM, soit (i) chaque chemin d'écoulement pour le modèle 2DM ou (ii) le transfert DM du modèle EDM, est théoriquement contrôlé par un paramètre de dispersion unique et indépendant des conditions hydrologiques. Il n'a cependant pas été possible de fixer le nombre de Péclet à une valeur unique pour le chemin 1 ou le chemin 2 selon le modèle 2DM sans diminuer de manière significative les performances du modèle. Ceci permet de remettre en question la réalité physique du modèle 2DM. Par contre, un nombre de Péclet de 200 a pu être fixé pour tous les essais avec le modèle EDM sans influencer les performances du modèle.

Id	R	Q	a_1	t_{adv1}	Pe_1	t_{adv2}	Pe_2	Nash	a_{DM}	Pe	t_{adv}	T_{exp}	Nash
	%	l/s	%	J	-	J	-	-	%	-	J	J	-
Test#1	33	67	53 0	16.0	153	19.3 17.1	73 80	1.00 0.98	6	200	14.9	3.1	1.00
Test#2	46	145	53	10.9	152	13.5	64	1.00	16		10.3	2.3	1.00
Test#3	39	158	34	8.3	233	11.9	27	0.98	29		8.1	4.5	0.99
Test#4	40	159	39	7.0	243	9.7	33	0.99	36		6.9	3.3	0.99
Test#5	39	205	39	5.7	266	8.1	28	0.99	39		5.7	3.1	0.99
Test#6	53	278	42	5.1	244	7.5	25	0.99	39		5.0	3.0	0.99
Test#7	38	261	40	5.0	157	7.1	29	0.99	25		4.8	2.3	1.00
Test#8	21	336	30	4.2	258	7.2	12	0.98	31		4.1	3.9	0.99

Tableau 6 : Résultats du calage des modèles DM, 2DM et EDM (Id : numéro de l'essai ; R(%) : Taux de restitution ; Q(l/s) : Débit. - Paramètres du modèle 2DM - a_1 et a_2 : coefficients de partage des transferts rapides (1) et lents (2) ; Pe_1 et Pe_2 : nombre de Péclet des transferts rapides (1) et lents (2), t_{adv1} et t_{adv2} : temps caractéristiques d'advection des transferts rapides (1) et lents (2) ; Nash : critère de Nash - Paramètres du modèle EDM - a_{DM} : coefficient de répartition ; Pe : nombre de Péclet, t_{adv} : temps caractéristique d'advection ; T_{exp} : temps de séjour du traceur dans le réservoir de stockage temporaire ; Nash : critère de Nash

4.5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont, du point de vue du critère de Nash, excellents pour tous les modèles testés. Les figures précédentes montrent cependant que le modèle 2DM, et *a fortiori* le modèle DM seul ne permet pas de reproduire correctement la fin des courbes de restitution, qui présentent une évolution exponentielle révélée sur les graphiques en coordonnées semi-logarithmiques. Ceci pourrait être révélé par l'utilisation d'un autre critère d'ajustement tel que l'utilisation du critère de Nash sur le logarithme des valeurs, ce qui n'est pas possible dans la version utilisée de TRAC. Cette décroissance exponentielle, et donc les faibles valeurs de concentration sont très bien reproduites par le modèle EDM : la pente de la décroissance exponentielle est ici contrôlée par le temps de séjour dans le réacteur parfaitement mélangé, soit l'effet retard qui serait apporté par les zones de plus faibles vitesses d'écoulement dans l'ensemble des cavités et vides karstiques du réseau de drainage karstique.

Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle à 2 chemins d'écoulement implique la plupart du temps la présence d'un bombement secondaire après le premier pic de restitution, qui s'observe bien sur les simulations de la Figure 23, sans que ce phénomène soit identifié sur les courbes mesurées.

Concernant les résultats des paramètres, le modèle 2DM ne met pas en évidence de relation simple entre les conditions hydrologiques matérialisées par le débit Q (ou le niveau d'eau à la source) et le paramètre a_1 . Si ce paramètre peut être nul en basses eaux (modèle DM applicable), il reste relativement stable selon les conditions hydrologiques. Selon ce modèle, le paramètre a_1 permet ainsi de quantifier à près de 40 % la contribution relative d'un réseau de drainage mieux karstifié caractérisé par un nombre de Péclet de l'ordre de 200, qui pourrait être inactif en basses eaux. Un autre chemin d'écoulement plus dispersif ($Pe < 100$) caractériserait l'écoulement karstique permanent. La Figure 25 permet de visualiser l'évolution des nombres de Péclet calculés en fonction des conditions hydrologiques, en utilisant le niveau d'eau mesuré à la source de la Vène lors de l'injection. Cette figure montre que si un seul chemin d'écoulement est envisageable en très basses eaux avec un nombre de Péclet légèrement inférieur à 100, les nombres de Péclet calculés sont de l'ordre de 20 à 30 pour le chemin d'écoulement « lent », et de l'ordre de 200 pour le chemin « rapide ».

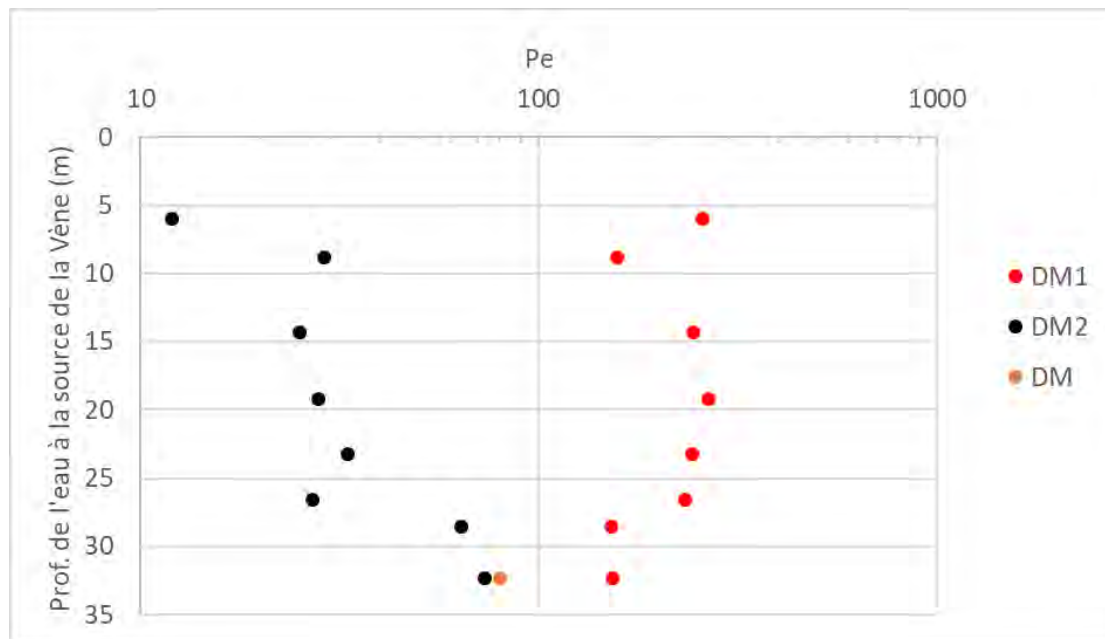


Figure 25 : Evolution des nombres de Péclet calculés pour les 2 chemins d'écoulements selon le modèle 2DM en fonction du niveau d'eau à la source de la Vène lors de l'injection

Les résultats obtenus avec le modèle EDM pour le paramètre a_{DM} montrent que le stockage temporaire concerne une part plus faible du flux de traceur en basses eaux. En effet, une valeur de 0 pour a_{DM} permettrait d'obtenir le modèle DM, qui représente relativement bien le transfert en basses eaux. Cependant, le comportement asymptotique exponentiel des courbes de restitution justifie le passage par un réservoir de stockage temporaire pour les autres conditions hydrologiques. En hautes eaux, plus de 30 % du flux de traceur circulent directement dans un système de conduit karstique dont le transfert est bien représenté par le modèle DM. Ce pourcentage de l'ordre de 30 % s'observe dès le test#2 réalisé pour une profondeur de 26.6 m au puits d'injection (Tableau 5). Le temps de séjour dans ce réservoir est relativement stable, de l'ordre de 3 jours, tandis que le temps d'advection dans le modèle DM varie de 4 à 15 jours avec les conditions hydrologiques.

Le graphique de la Figure 26 montre l'évolution de ces 2 paramètres avec la profondeur mesurée à la source de la Vène lors de l'injection. En basses eaux, le temps de séjour dans le réservoir de stockage devient ainsi relativement négligeable par rapport au temps de transfert dans le réseau de drainage, ce qui explique pourquoi le modèle DM simple reste satisfaisant. Au contraire, plus les conditions hydrologiques évoluent vers les hautes eaux, plus le temps de transfert dans le réseau de drainage diminue pour devenir égal au temps de séjour dans le réservoir, ce qui explique pourquoi les courbes en très hautes eaux deviennent fortement dissymétriques.

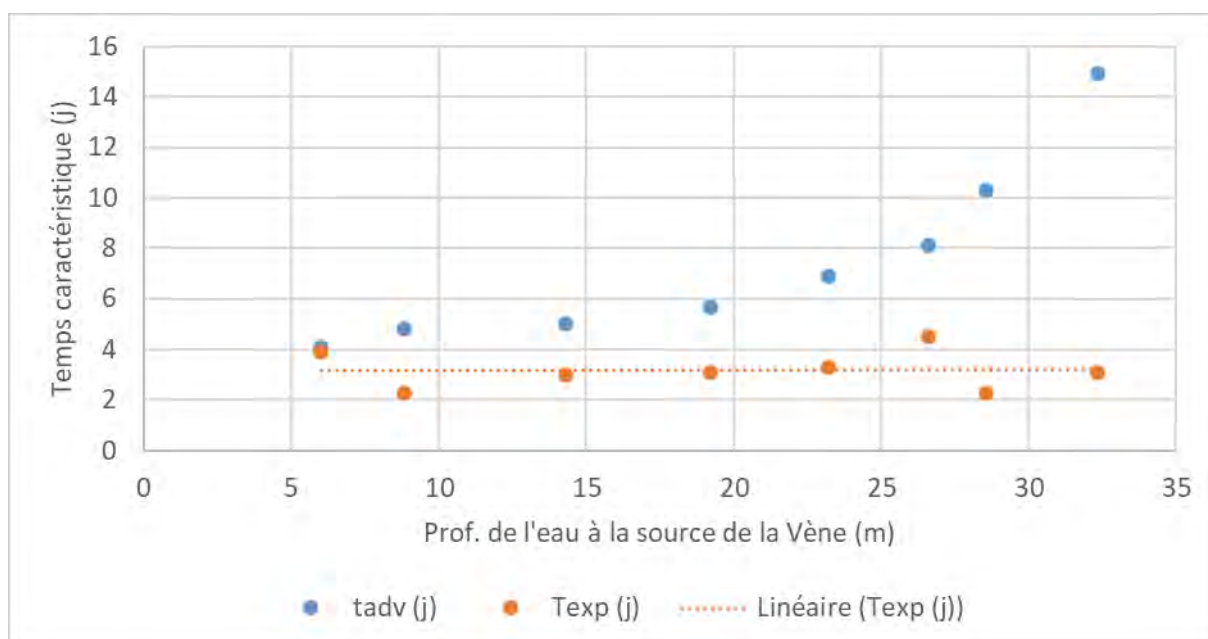


Figure 26 : Évolution des temps caractéristiques t_{adv} et T_{exp} calculés pour le modèle EDM en fonction du niveau d'eau à la source de la Vène lors de l'injection

Le modèle EDM permet ainsi de bien distinguer le temps de séjour lié à un transfert advectif (t_{adv}) dépendant du débit d'un temps de séjour lié aux phénomènes de stockage temporaire (T_{exp}). Le paramètre t_{adv} permet ainsi de calculer une vitesse d'advection en considérant une distance parcourue par le traceur de 6100 m. Cette vitesse apparente varie de 17 à 62 m/h. La relation linéaire entre cette vitesse et le débit Q à l'exutoire est donnée sur la Figure 27 ($R^2=0.94$). La pente de cette droite permet de calculer la section d'écoulement équivalente (18.3 m^2), qui donne un diamètre de conduit cylindrique équivalent à l'ensemble du drainage karstique du système tracé entre la Vène et Issanka de l'ordre de 4 à 5 m.

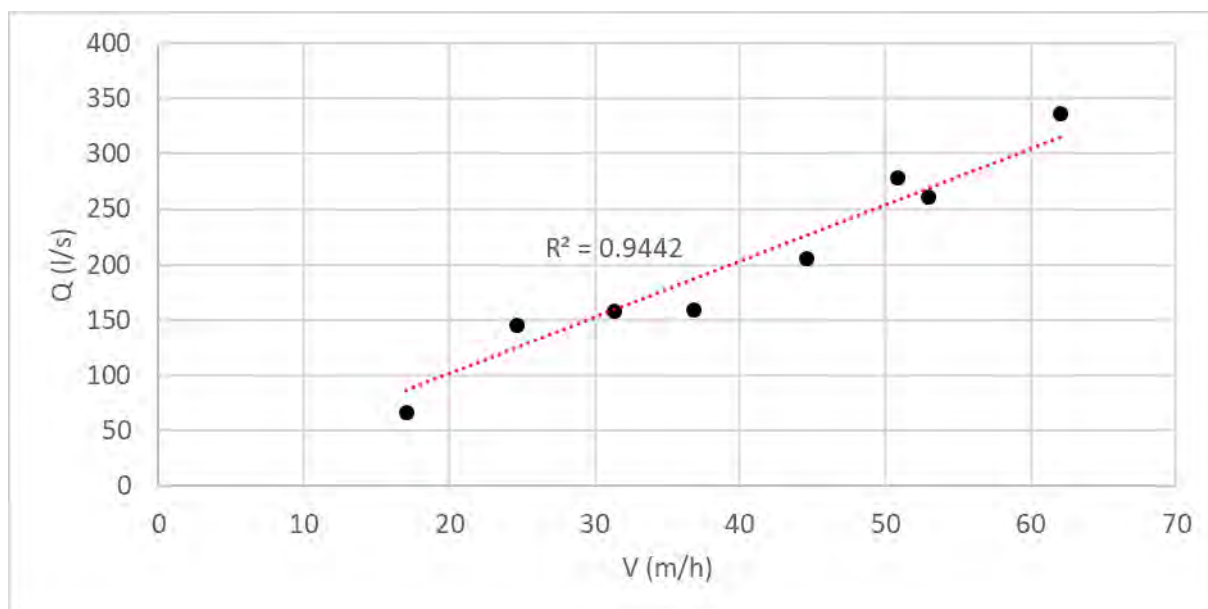


Figure 27 : Relation entre le débit et la vitesse d'écoulement calculée pour les résultats du modèle EDM

4.5.1. Conséquences sur le modèle conceptuel des écoulements entre la Vène et Issanka

Ainsi, le modèle EDM permet, avec un paramètre de calage de moins et un paramètre fixé pour l'ensemble des résultats ($Pe=200$) d'obtenir des résultats plus cohérents avec les observations, notamment à la fin de la restitution. Seuls les 3 paramètres relatifs aux temps caractéristiques (t_{adv} , T_{exp}) et à la répartition du flux de traceur (a_{DM}) sont utilisés pour le calage du modèle. L'évolution des paramètres selon les conditions hydrodynamiques permettent d'expliquer l'origine des fortes dissymétries observées sur les courbes de restitution, notamment en hautes eaux lorsque le temps de séjour dans le réservoir de stockage temporaire devient très important par rapport au temps de transfert advectif. Ce système traçage entre la source de la Vène et les sources d'Issanka serait donc influencé par au moins une cavité karstique responsable du stockage temporaire du traceur. Le fait que le temps de séjour dans cette cavité soit indépendant des conditions hydrologiques permet de proposer le schéma conceptuel suivant :

La source de la Vène est un point de débordement du karst. Les conditions d'émergence de la source de la Vène ne sont pas bien connues, mais il pourrait s'agir d'un lieu où le réseau karstique présente un développement subvertical qui s'individualise du réseau drainant les eaux vers Issanka. Lorsque la source de la Vène ne coule plus, ce réseau est donc susceptible de « piéger » une quantité d'eau importante qui rejoint lentement le réseau de drainage sous-jacent connecté aux sources d'Issanka, et ce quelles que soient les conditions hydrologiques. C'est même au moment des plus hautes eaux, lorsque la source s'arrête juste de couler que les flux s'annulent puis s'inversent pour réalimenter le drain principal vers Issanka. On peut alors s'attendre à une vitesse de déplacement très faible dans cette partie du réseau en hautes eaux, comme l'illustre le schéma de la Figure 28.

En condition de crue (Figure 28 A), le flux est ascendant dans le drain pour alimenter la source de la Vène qui déborde. L'injection de traceur est donc impossible. En hautes eaux, lorsque le niveau piézométrique diminue pour atteindre la cote de débordement de la source (Figure 28 B), le flux s'annule dans le drain. Il est possible de réaliser une injection de traceur depuis la source, mais le traceur sera d'abord piégé dans le drain où le flux est très faible. Le drain constitue alors un volume mort qui retarde la migration du traceur vers les exutoires d'Issanka. En basses eaux (Figure 28 C), l'effet retard induit par ce volume mort existe toujours mais devient négligeable devant le temps de transfert vers Issanka du fait de la diminution de la vitesse de transit.

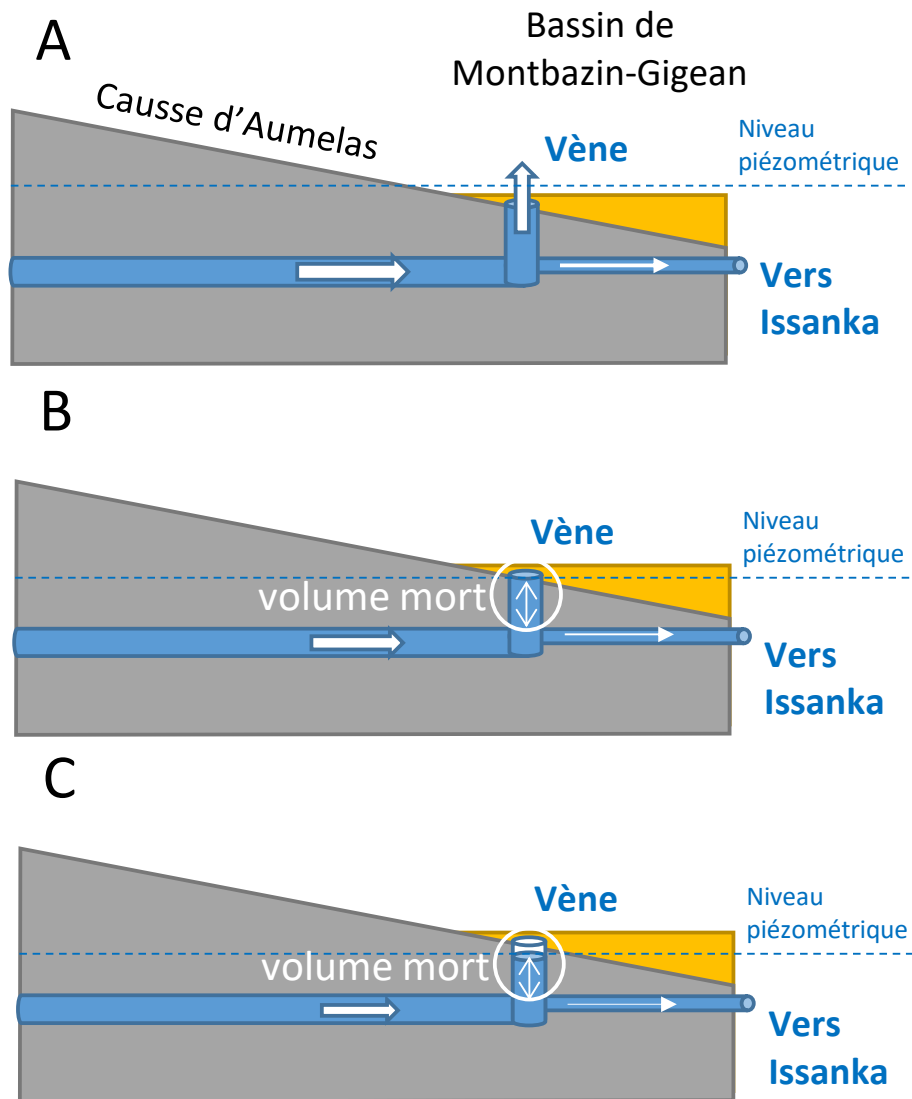


Figure 28 : Schéma représentant l'évolution du sens de circulation de l'eau dans le drain alimentant la source de débordement de la Vène selon les conditions hydrologiques.

Le réseau karstique situé en amont immédiat de la source de la Vène se comporte alors en dehors des périodes de crue comme un Système Annexe au Drainage (SAD, Marsaud 1996) vis-à-vis du drain principal qui s'écoule vers Issanka (Figure 28 B et C). L'injection de traceur dans ce SAD entraîne le stockage temporaire du traceur à proximité du point d'injection pendant plusieurs jours. Ce retard a peu d'influence en très basses eaux compte tenu du temps de transfert de près de 15 jours sous le bassin de Montbazin Gigean, mais il influence fortement la forme de la courbe de restitution en hautes eaux.

Ce modèle conceptuel d'écoulement karstique entre les sources de la Vène et d'Issanka permet de bien reproduire les dynamiques de restitution des traceurs selon les conditions hydrologiques, mais il ne permet pas d'expliquer la présence d'une zone de transition en basses-eaux identifiées sur l'évolution piézométrique du piézomètre de suivi BSS002JDBC (Figure 10b, transition 2).

Pour comprendre l'origine de cette transition nous avons comparé les niveaux d'eau aux sources d'Issanka à celui de la source de la Vène (Figure 29). Le piézomètre de la Vène présente une chronique influencée par le débordement de la source de la Vène pour une hauteur d'eau supérieure à 38 mNGF (repère 1 sur la Figure 29). De la même manière, au

niveau des exutoires d'Issanka, les sources ne débordent plus dès que la hauteur d'eau est inférieure à 9.2 mNGF (droite discontinue noire). Pour les niveaux inférieurs à cette cote, le système karstique est drainé artificiellement pour alimenter le captage d'Issanka, mais il n'y a plus de débordement naturel. La relation qui lie la charge hydraulique au débit de l'exutoire est donc modifiée au niveau de l'exutoire. Ce changement de condition limite à l'aval du système provoque un changement plus ou moins synchrone sur la chronique du piézomètre de la Vène à +/- 22 mNGF (seuil n° 2 sur la Figure 29).

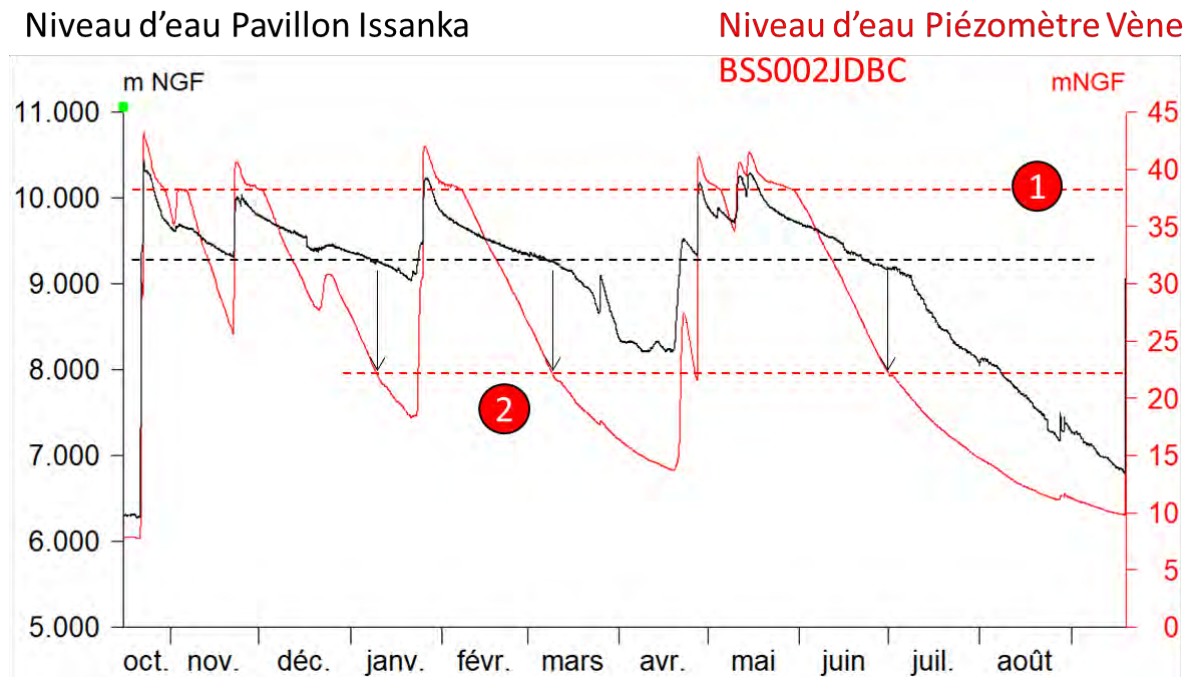


Figure 29 : Comparaison des niveaux piézométriques aux sources d'Issanka (courbe noire) avec celui de la source la Vène (courbe rouge), au niveau du piézomètre BSS002JDBC.

Ainsi ce changement de condition aux limites à l'exutoire des sources d'Issanka pourrait être à l'origine des différentes observations, soit :

- de la rupture de pente observée sur le niveau piézométrique de la source de la Vène (transition 2, Figure 10b) ;
- de L'effet de traine (dissymétrie) sur les courbes de restitution du traceur, qui s'observe fortement en hautes eaux mais qui est aussi présent en moindre mesure en basses eaux : ce changement de conditions hydrauliques modifie la dynamique des écoulements à proximité de la source de la Vène, et dans le réservoir de stockage sous-jacent assimilé à un SAD, impactant les courbes de restitution du traceur : -(i) en hautes eaux (période où les sources d'Issanka débordent), le temps de stockage dans ce SAD est du même ordre de grandeur que le temps de transfert qui est particulièrement rapide du fait du débordement des sources ; -ii) en basses eaux le temps de stockage est très nettement inférieur au temps de transfert, ce qui rend alors son effet peu visible sur les courbes de restitution ;
- de l'augmentation du temps d'arrivée qui ne témoigne en fait que d'un changement notable de vitesse de transfert du fait du changement brutal des conditions aux limites à l'aval du système.

5. Conclusion

Cette étude sur l'impact de la variabilité des conditions hydrologiques sur le transfert de masse de traceurs a permis de caractériser un fonctionnement atypique du réservoir karstique compris entre sa zone à l'affleurement (source de la Vène) et sa zone confinée (sources d'Issanka).

Une zone de transition observable sur les niveaux piézométriques (Figure 10b) semblait être à l'origine de différences dans les temps d'arrivée du traceur (Figure 18), mais aussi dans les formes des courbes de restitution (dissymétrie de la courbe avec un effet de traîne important, observable sur la Figure 16). En essayant de reproduire cette dissymétrie et de comprendre son origine, nous avons testé plusieurs modèles : les modèles 2DM et DM ne permettent pas de reproduire correctement la fin des courbes de restitution, qui présentent une évolution exponentielle révélée sur les graphiques en coordonnées semi-logarithmiques (Figure 23 et Figure 24). Seul le modèle EDM permet de reproduire l'entièreté des courbes de restitution, notamment en temps long : cette évolution exponentielle en temps long est observable quel que soient les conditions hydrologiques, montrant que la dissymétrie des courbes n'est pas associée à une zone de transition particulière mais plutôt à une modification des écoulements associée aux conditions hydrologiques.

Les modélisations effectuées sur l'ensemble des données ont permis de tester différents scénarios de fonctionnement du réservoir. L'évaluation de ces scénarios par le coefficient de Nash a permis de valider le fonctionnement le plus probable et, surtout le plus valable par rapport aux données de terrain. Ce modèle conceptuel du fonctionnement du système « Vène – Issanka » peut être illustré schématiquement par la Figure 30, avec :

- l'existence d'un Système Annexe au Drainage (SAD) qui correspond au volume d'eau compris entre le réseau karstique principal et la source de la Vène. Lorsque celle-ci déborde, les flux existants dans cette zone sont sortants ; lorsqu'elle est à sec, les flux s'inversent et s'évacuent vers les sources d'Issanka (Figure 28) ;
- le déplacement du traceur, va traverser cette zone de SAD, localisée en dessous de la source de la Vène, pour aller vers le conduit principal l'amenant vers les sources d'Issanka ;
- ce traceur va s'homogénéiser dans cette cavité, et y rester un certain « temps de stockage » avant de se propager dans le réseau : une partie va être expulsée (40 %) vers les sources d'Issanka, alors que l'autre partie va partir plus en aval du système. Cette partie probablement majoritaire (60 % au maximum en négligeant les phénomènes de dégradation et d'adsorption) continuera son chemin en profondeur en aval des sources ;
- le temps de stockage temporaire du traceur dans le réservoir, noté t_s sur la Figure 30, correspond au paramètre T_{exp} du modèle numérique EDM, et le temps de transfert dans le réservoir karstique jusqu'aux sources d'Issanka correspond au paramètre t_{adv} de ce même modèle (Figure 22). La Figure 30 illustre ainsi les évolutions respectives de ces deux paramètres selon les conditions hydrogéologiques en lien avec les résultats du modèle présentés sur la Figure 26.

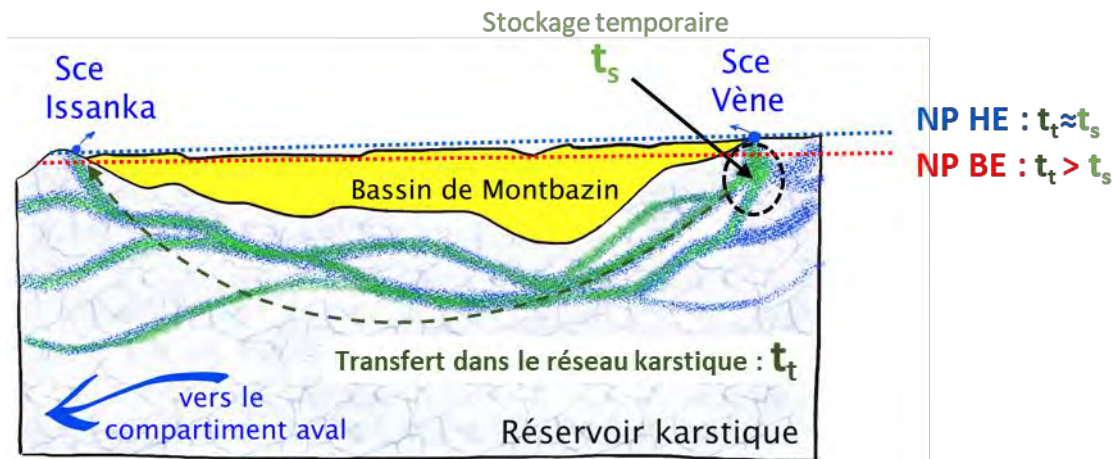


Figure 30 : Coupe conceptuelle du fonctionnement karstique entre la source de la Vène et celles d'Issanka, sous le bassin de Montbazin Gigean. Le déplacement du traceur est représenté schématiquement en vert dans les conduits karstiques dessinés en bleu. Entre 40 % et 50 % du traceur est restitué aux sources d'Issanka, alors que le reste continue vers le compartiment aval. Une zone de stockage existant à proximité de la source de la Vène est signalé par un cercle noir pointillé. Le niveau piézométrique (NP) est représenté en trait pointillé bleu en Hautes Eaux (HE), en trait pointillé rouge en Basses Eaux (BE). t_s représente le temps de séjour du traceur dans la zone de stockage temporaire, t_t représente le temps de transfert du traceur sur la distance Sce de la Vène – Sces d'Issanka (trajet apparent représenté par la flèche verte pointillée).

On notera que la source de la Vise n'a pas pu être identifiée comme un exutoire secondaire du système tracé du fait de conditions de mesure non adaptées aux fluorimètres de terrain : l'eau saumâtre a rapidement détérioré les appareils et le débit associé au temps de transfert beaucoup plus long implique une forte dispersion du traceur conduisant à des concentrations probablement en dessous du seuil de détection des appareils.

En perspectives, il conviendrait de réaliser de nouvelles opérations de traçage depuis le massif de la Gardiole pour mieux comprendre l'organisation du drainage vers les sources de Cauvy et d'Ambressac. L'essai conduit depuis le forage du Cèdre n'a pas permis de préciser la délimitation de ces systèmes karstiques et d'autres points d'injection doivent être identifiés. De même, d'autres essais pourraient être conduits en aval d'Issanka pour préciser l'organisation du drainage karstique dans le compartiment aval vers la source de la Vise, en utilisant un dispositif de suivi adapté aux eaux saumâtres.

Cette étude montre également l'intérêt de suivre avec précision les débits des exutoires du système de Thau, et notamment des sources d'Issanka et les prélèvements associés. Ce suivi quantitatif pourrait être amélioré afin de disposer de chroniques plus fiables à un pas de temps horaire ou inférieur.

6. Bibliographie

- Bailly-Comte, V., Durepaire, X., Batiot-Guilhe, C., et Schnegg, P.-A.** (2018). In situ monitoring of tracer tests: how to distinguish tracer recovery from natural background. *Hydrogeology Journal*, Springer Verlag, 2018, 26 (6), pp.2057-2069, <https://dx.doi.org/10.1007/s10040-018-1748-8>
- Bailly-Comte, V., Jourde H., Roesch A., Pistre S., Batiot-Guilhe C.** (2008). Time series analyses for karst/river assessment. Case of the Coulazou River (Southern France). *Journal of Hydrology*. 349, 98-114.
- Bailly-Comte, V., Pistre, S.** (2021). A parsimonious approach for large-scale tracer test interpretation. *Hydrogeol J* 29, 1539–1550 <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02327-x>.
- Behrens H., Beims U., Dieter H., Dietze G., Eikmann T., Grummt T., Hanisch H., Henseling H., Käss W., Kerndorff H., Leibundgut C., Müller-Wegener U., Rönnefahrt I., Scharenberg B., Schleyer R., Schloz W., Tilkes F.** (2001). Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal*. 9, 321–325.
- Bodin, J.** (2020). MFIT 1.0.0: Multi-Flow Inversion of Tracer breakthrough curves in fractured and karst aquifers, *Geosci. Model Dev.*, 13, 2905–2924, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2905-2020>
- Bonnet, A. & Paloc, H.** (1969). Les eaux des calcaires jurassiques du bassin de Montbazin-Gigean et de ses bordures (Pli de Montpellier et massif de la Gardiole, Hérault). *Bull. BRGM* (2), III, 3-1969, 12 p.
- Brunet P., Hernandez F. et Muller F.** (2008). Compte rendu du traçage effectué sur la source de la Vise le 30/01/2008. Rapport interne Hydrosociences Montpellier, 7 p.
- Dorflinger N.** (2010). Guide méthodologique, Les outils de l'hydrogéologie karstique. Avec la collaboration de Ph. Crochet, R. Guerin, N. Jozja, B. Marsaud, P-H. Mondain, Ph. Muet, V. Plagnes ; BRGM RP-58247-FR, 246 p., 82 ill., 5 ann.
- Field, M. S.** (2002). U.S. Epa. The Qtracer2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington Office, Washington, DC, EPA/600/R-02/001, 2002.
- Ford D.C., Williams P.** (1989). Karst geomorphology and hydrology. London Unwin Hyman, 601 p.
- Gayet, J.-C.** (1979). Essai d'inventaire des phénomènes hydrogéologiques du Causse d'Aumelas et des Monts de la Gardiole. Spéléoclub de Cournonterral, Spéléoclub Alpin Languedocien de Montpellier, Spéléoclub de Frontignan, pp. 47-89.
- Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C.** (2008). Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology* 37(1), 27-40.

Gutierrez, A., Klinka, T., Thiéry, D. (2012). Manuel d'utilisation de TRAC : Aide à l'interprétation de traçages en milieux poreux. BRGM rapport RP-60660-FR (2012)

Gutierrez, A., Klinka, T., Thiéry, D., Buscarlet, E., Binet, S., Jozja, N., Défarge, C., Leclerc, B., Fécamp, C., Ahumada, Y., Elsass, J. (2013). TRAC, a collaborative computer tool for tracer-test interpretation, EPJ Web of Conferences, 50 (2013) 03002, DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135003002>

Hakoun, V., Ladouche B. (2022). Modélisation hydrogéologique numérique de l'aquifère karstique de Thau. Rapport BRGM/RP-71757-FR.

Hauns, M., Jeannin, P.-Y., Atteia, O. (2001). Dispersion, retardation and scale effect in tracer breakthrough curves in karst conduits, Journal of Hydrology, Volume 241, Issues 3–4, Pages 177-193, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00366-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00366-8)

Hemelsdaël R, Séranne M, Caritg S, Courrioux G, Husson E, Jacob T, et al. (2021). Dem'Eaux Thau – Construction d'un modèle géologique 3D du secteur Montpellier-Sète et de l'étang de Thau. BRGM. RP-70789-FR.

Käss W. (1998). Tracing Technique in Geohydrology. Balkema, Rotterdam, 581p.

Kilpatrick, F.A. & Wilson, Jr. J.F. (1989). Measurement of time of travel in streams by dye tracing. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 3. Chapter A9. 27p.

Kreft A. & Zuber A. (1978). On the physical meaning of the dispersion equation and its solutions for different initial and boundary conditions. Chemical Engineering Science. 33(11), p. 1471-1480.

Ladouche B., Lamotte C., Hemelsdael R., Pétré M.A., Dewandel B., Léonardi V., Seidel J.L., Séranne M. (2019). Dem'Eaux Thau - Synthèse et valorisation préliminaire des données sur l'hydrosystème de Thau (34). Rapport final. BRGM/RP-68483-FR, 313 p., 133 fig., 6 tab., 6899 ann.

Ladouche, Bakalowicz, Courtois, Doerfliger, Pinault, Chemin et Anus, (2001). Étude du pourtour est de l'étang de Thau, phase II, Fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau, Rapport BRGM RP-50787-FR.

Lamotte C. (2019). Projet DEM'Eaux-Thau - Instrumentation de la source de la Vise à Balaruc-Les-Bains (34) - Rapport de fin de travaux – Livrable L7 - Rapport final. BRGM/RP-69163-FR, 23 p., 11 ill., 1 ann.

Lepiller M. & Mondain P.H. (1986). Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique. Mise en œuvre et interprétation. Hydrogéologie, 1, 33-52.

Maloszewski P. & Zuber A. (1990). On the parameter estimation from artificial tracer experiments. ModelCARE 90: Calibration and Reliability in Groundwater Modelling (Proceedings of the conference held in The Hague, September 1990). IAHS Publ. no. 195., 53-62.

Marechal J-C, Ladouche B., Hakoun V, Dewandel B, Lamotte C. (2022). Inversac de la source sous-marine de la Vise sous la lagune de Thau : mécanisme et modélisation. Rapport final. BRGM/RP-70839-FR.

Marino, M. A.: Distribution of contaminants in porous media flow, *Water Resour. Res.*, 10, 1013–1018, <https://doi.org/10.1029/WR010i005p01013>, 1974.

Massei, N., H. Wang, Field, M. Dupont, J. Bakalowicz, M. Rodet, J. (2006). Interpreting tracer breakthrough tailing in a conduit-dominated karstic aquifer. *Hydrogeology Journal* 14(6), 849-858.

Perrin, J. & Luetscher, M. (2008). Inference of the structure of karst conduits using quantitative tracer tests and geological information: example of the Swiss Jura. *Hydrogeology Journal* 16, 951–967.

Schnegg, P.-A. (2002). An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: *Groundwater and Human Development*, Bocanegra, E - Martinez, D.- Massone, H. (Eds), 2002, 1484-1488.

Selles, A. (2010). Caractérisation du transfert de masse en domaine karstique - Réalisation et interprétation d'un traçage artificiel au sein d'un aquifère karstique (Aumelas-Thau, France). Rapport de Stage de Recherche, Master 2 en Recherche Eau et Environnement (BGAE - R2E), Université Montpellier 2.

Selles, A., Leonardi, V., Bailly-Comte, V., Jourde, H. (2011). Influence des relations karst/rivière sur la restitution plurimodale d'un traçage artificiel : Cas du Causse d'Aumelas. *Proc. H2Karst, 9th Conference on Limestone Hydrogeology*, Besançon (France), pp. 439–442.

Smart C.C. (1988). Quantitative tracing of the Maligne karst system, Alberta, Canada. *Journal of Hydrology*, 98, 185-204.

Tournoud M.G., Payraudeau S., Cernesson F., Salles C. (2006). Origins and quantification of nitrogen inputs into a coastal lagoon: Application to the Thau lagoon (France). *Ecological Modeling* 193 (2006), 19–33.

Worthington S. R. H. (2007). Groundwater Residence Times In Unconfined Carbonate Aquifers. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 69, no. 1, 94–102.

Zuber, A. (1986). Review of existing mathematical models for interpretation of tracer data in hydrology, *Mathematical models for interpretation of tracer data in groundwater hydrology*. IAEA-TECDOC-381, Vienna, pp. 69-116



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Occitanie

1039 rue de Pinville

34000 Montpellier

Tel. : 04.67.15.79.80

www.brgm.fr