

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
<i>Accroissement du risque d'intrusion saline dans les aquifères karstiques côtiers : exemple du système de Thau</i>
Nom des auteurs
MARECHAL, Jean-Christophe ^(1,2) ; LADOUCHE, Bernard ^(1,2) ; LAMOTTE, Claudine ⁽¹⁾ ; DEWANDEL, Benoit ^(1,2) ; HAKOUN, Vivien ^(1,2) ; PERROCHET, Pierre ⁽³⁾
Affiliation
(1) BRGM, Université de Montpellier, Montpellier, France (2) G-eau, UMR 183, INRAE, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Supagro, BRGM, Montpellier, France (3) CHYN, Univ Neuchâtel, Neuchâtel, Suisse

Contexte

Les ressources en eau souterraine des calcaires jurassiques karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de la lagune de Thau, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1ère station thermale en France avec près de 53 000 curistes en 2019), et l'agriculture (figure 1). Ce secteur est situé à la convergence d'eaux souterraines provenant de divers réservoirs superficiels et profonds : eaux karstiques froides des Causses d'Aumelas et de la Gardiole, eaux d'origine marine (étang et mer) et eaux thermales chaudes et minéralisées. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes dont les déterminants ne sont pas tous connus.

Cet aquifère karstique est confronté à des phénomènes temporaires d'intrusion d'eau saumâtre (appelés « inversac ») par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise, exutoire le plus en aval de l'aquifère, située dans l'étang de Thau à une trentaine de mètres de profondeur.

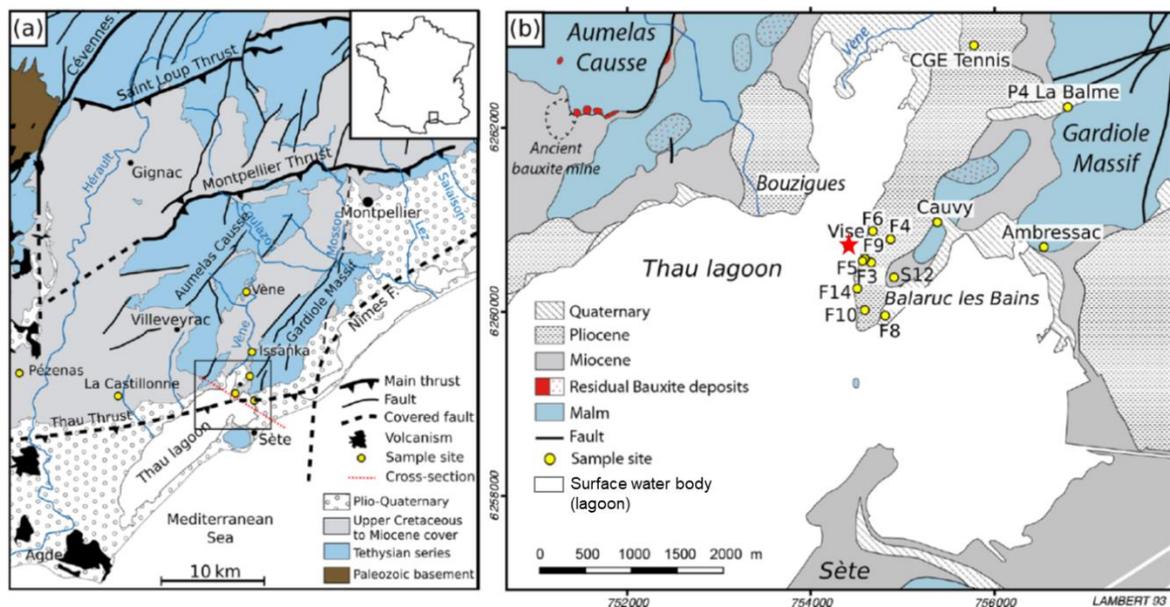


Figure 1: carte géologique du système karstique de la Vise (d'après Petre et al. 2020)

Depuis la fin des années 1960, 7 phénomènes d'inversac ont été détectés. Pendant ce phénomène qui peut durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014 et près de 18 mois en 2020-2022), la source de la Vise, au lieu de fournir de l'eau douce utile à la vie biologique de l'étang de Thau, absorbe l'eau saumâtre de la lagune conduisant à une salinisation de l'aquifère.

Grâce à un dispositif expérimental innovant, des données inédites sur les débits de la Vise ont été acquis lors du dernier inversac permettant ainsi de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de ce phénomène, validée par différentes approches de modélisation mettant en relation les conditions hydrologiques et hydrogéologiques avec le fonctionnement de la source de la Vise en période dite normale et en période d'inversac.

Analyse des séries chronologiques

Les séries chronologiques des principales variables hydrologiques de la zone d'étude sont illustrées à la Figure 2. Durant les premiers mois, le débit d'exhaure de la source (Figure 2 b) est bien corrélé au niveau d'eau dans l'aquifère (Figure 2 c). Le 28 novembre 2020 à 09h40, une inversion brutale de flux se produit, le débit passant de $+0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ d'exfiltration à $-0,370 \text{ m}^3/\text{s}$ de débit d'infiltration dans l'aquifère karstique. Le débit d'infiltration diminue lentement au cours des mois suivants avant qu'un brusque changement de débit n'apparaisse le 14 mars 2022

à 08h30, avec un retour aux conditions normales et une exfiltration de $+0,200 \text{ m}^3/\text{s}$ débit. Les changements de conductivité électrique de l'eau (CE) et de la température (T) (Figure 2 d,e) sont fortement dominés par le processus d'inversac : alors que l'eau souterraine douce exfiltrée est caractérisée par une faible conductivité électrique (autour de 2.5 mS/cm) et une température proche de 20°C , l'eau de mer infiltrée induit une augmentation soudaine et importante de la CE mesurée (jusqu'à 60 mS/cm), et une diminution soudaine de la température car l'eau de la lagune est froide pendant l'hiver. Les conditions hydrologiques au début de l'inversac sont les suivantes : niveau d'eau élevé dans la lagune, niveau d'eau bas dans l'aquifère et fort contraste de masse volumique entre les eaux de la lagune et de l'aquifère karstique.

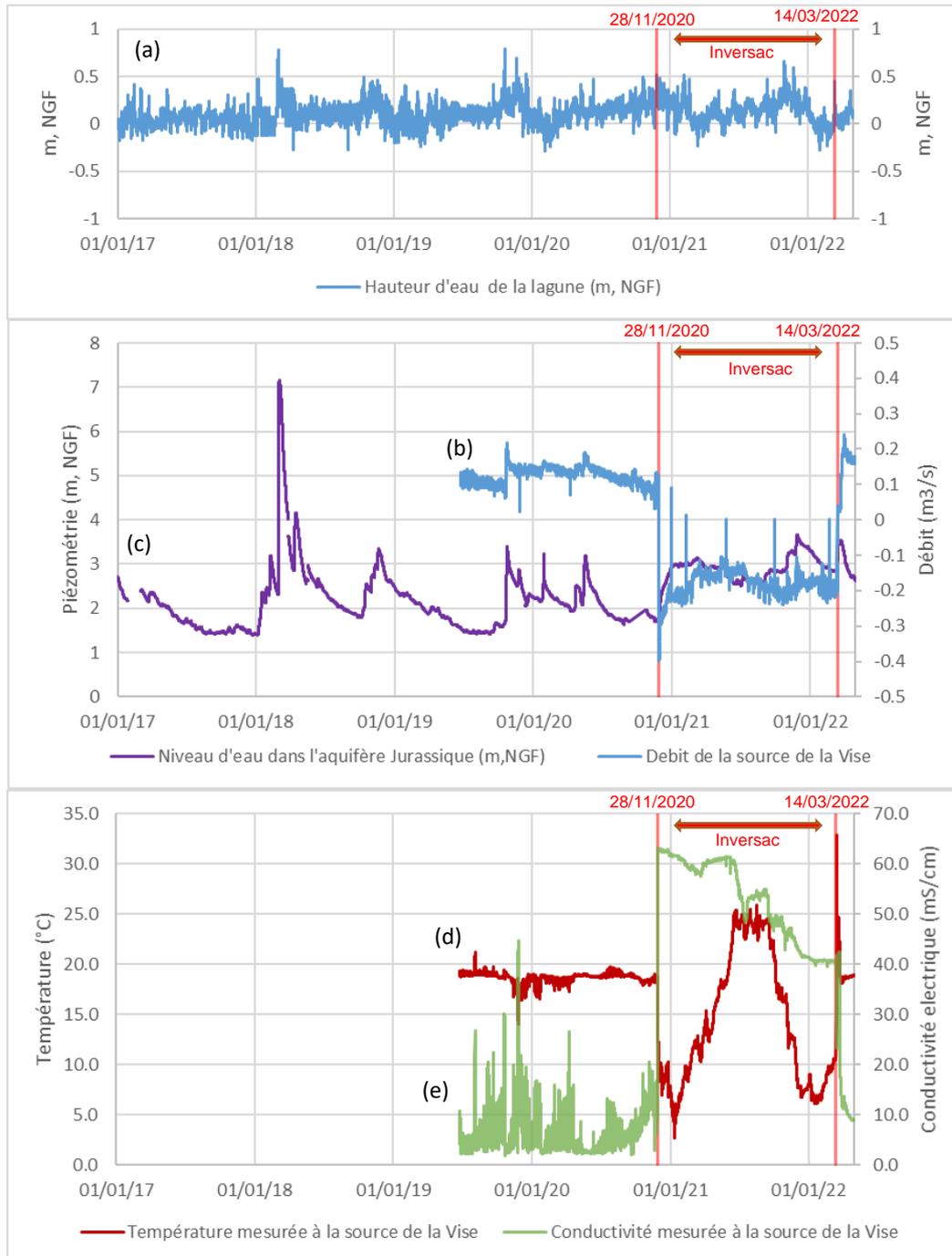


Figure 2: évolution temporelle des principales variables hydrologiques (a) niveau d'eau de la lagune (b) débit mesuré à la source Vise (c) niveau d'eau dans l'aquifère jurassique mesuré au puits P4 (d) température mesurée à la source Vise (e) conductivité électrique mesurée à la source Vise

Description physique du mécanisme d'inversion de flux

L'analyse des données hydrogéologiques ont permis de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de l'inversac, expliqué par des conditions de gradient hydraulique de charge, corrigées de la densité de l'eau, fluctuantes au cours du cycle hydrologique schématisé sur la figure 3. En hypothèse hydrostatique, la direction du flux vertical au sein du conduit karstique connectant la lagune de Thau avec l'aquifère jurassique est définie par la différence de charge hydraulique, corrigée de la densité de l'eau, entre ces deux masses d'eau. Lorsque le niveau d'eau de la lagune de Thau et sa salinité sont élevés alors que le niveau piézométrique de l'aquifère est bas, les risques d'inversac augmentent. À l'inverse, ils sont faibles lorsque le niveau de la lagune et sa salinité (S) sont peu élevés alors que les niveaux dans l'aquifère (H_p) sont hauts. Ce mécanisme met en évidence l'importance de ces variables que sont la hauteur d'eau dans la lagune (H_s) au-dessus de la Vise, la hauteur piézométrique dans l'aquifère ainsi que la densité de la lagune (fonction de S et T) et de l'aquifère pour une surveillance future du phénomène.

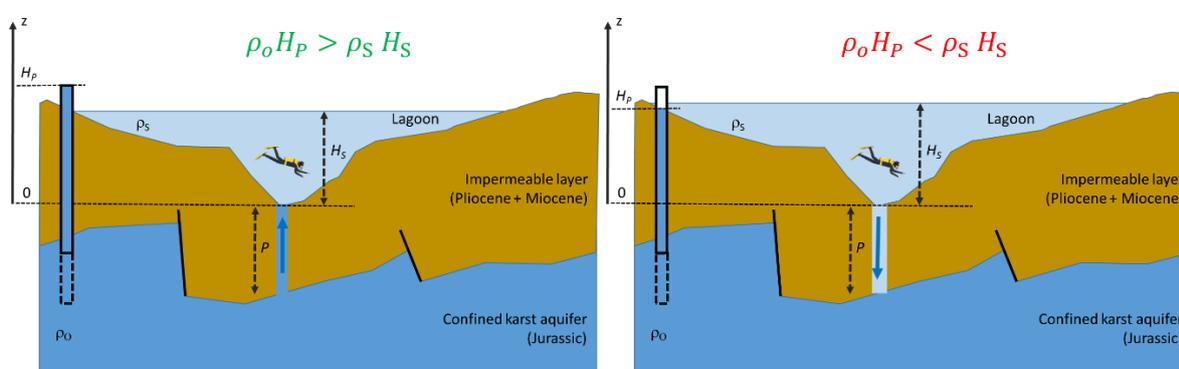


Figure 3: Schéma de la coupe hydrogéologique à la source sous-marine de Vise en (a) conditions normales et (b) conditions d'inversac

Le mécanisme proposé, avec le remplissage subit d'un conduit karstique vertical lors du démarrage de l'inversac, permet d'expliquer le phénomène de rebond piézométrique (augmentation subite des niveaux d'eau de l'ordre de 2.3 m) observé sur le secteur d'étude après chacun des inversacs. Ceci nous permet de mieux préciser la géométrie du système à proximité de la source, à savoir une localisation du toit du Jurassique à environ -99 m NGF (plus ou moins 10 m) au droit de la Vise, soit $P=70$ m environ. Cette explication du phénomène de rebond a été validée au moyen d'un modèle analytique diffusif simple, à régime d'écoulement linéaire, mettant en évidence le rôle majeur de la karstification dans l'aquifère.

Une modélisation numérique des écoulements et du transport (de sel) souterrains a été réalisée au moyen du code Feflow pour simuler les impacts du cycle hydrologique sur les flux d'eau au sein du conduit karstique. Il a permis de confirmer le mécanisme proposé et de mettre en évidence le rôle du rebond piézométrique dans la durée des phénomènes d'inversac. En effet, une fois l'inversac mis en place et le conduit karstique rempli d'eau salée, la charge hydraulique à compenser par l'aquifère pour contrecarrer l'intrusion est augmentée d'environ 2.3 m au niveau de la source. Seuls des épisodes pluvieux rares (de cumul supérieur à 100 mm) peuvent induire une recharge suffisante pour provoquer une telle hausse de niveau piézométrique : ceci explique ainsi la longue durée des inversacs une fois ceux-ci mis en place.

Des équations prenant en compte de façon simplifiée les écoulements souterrains au sein de l'aquifère jurassique et du conduit karstique ont permis d'expliquer les débits observés à la source de la Vise en fonction des conditions hydrologiques. Ces équations ont permis de proposer deux indicateurs : en période normale, un indicateur de risque d'inversac et, en période d'inversac, un indicateur de probabilité de fin d'inversac. Le suivi dans le futur des trois

variables impliquées dans ces indicateurs (charge hydraulique au sein de l'aquifère jurassique représentative de l'état de l'aquifère à sa limite amont, hauteur de la lagune dans le secteur de la Vise, densité de l'eau de la lagune dans le secteur de la Vise) permettra d'identifier les risques d'inversac.

Q+ : Condition normale tant que $H_p > \rho_e/\rho_0 H_s$

$$Q_{Vise}^+ = \frac{C^2}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4A^2}{C^2} (H_p - \rho_e/\rho_0 H_s)} - 1 \right)$$

Avec ρ_e/ρ_0 : ratio masse volumique (ρ_e : lagune; ρ_0 : eau douce du karst)

A (m^2/s) : « coefficient de Transmissivité » de l'aquifère Jurassique

C (m^2/s) : « coefficient de Transmissivité » du conduit karstique entre la Vise et l'aquifère Jurassique

Q- : Condition Inversac tant que $H_p < \rho_e/\rho_0 (H_s + P) - P$

$$Q_{Vise}^- = -\frac{C^2}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4A^2}{C^2} (\rho_e/\rho_0 (H_s + P) - H_p - P)} - 1 \right)$$

Cette étude a été menée au cours du projet de recherche DEM'Eaux Thau dont l'objectif était de mieux comprendre la structure et le fonctionnement d'un hydrosystème complexe dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et de développer un outil de gestion des eaux souterraines. Ce projet scientifique pluridisciplinaire a été 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 par les partenaires opérationnels (rapports publics disponibles sur site du BRGM).