

Document à accès immédiat

Inversac de la source sous-marine de la Vise sous la lagune de Thau : mécanisme et modélisation

Rapport final

BRGM/RP-70839-FR

Juin 2022

Étude réalisée dans le cadre du projet
BRGM RP16LRO005

Ladouche B., Maréchal J.-C., Hakoun V., Dewandel B., Perrochet P.
Avec la collaboration de Lamotte C.

Vérificateur :

Nom : T. KLINKA

Fonction : Hydrogéologue

Date : 23/06/2022

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Blum

Fonction Directrice régionale
Occitanie

Date : 21/10/2022

Signature :



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/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots-clés : Inversac, Intrusion saline, Source karstique, Source sous-marine, Modélisation, Aquifère karstique, Karst

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

Ladouche B., Maréchal J-C., Hakoun V., Dewandel B., Perrochet P., 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, 103 p., 71 ill., 2 Tab., 2 ann., 1 clé USB.

Synthèse

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète, SIAEP Balaruc-Frontignan, SBL), mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de l'étang, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1^{ère} station thermale en France avec près de 53 000 curistes en 2019), et l'irrigation. 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, située dans l'étang de Thau. 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. Ce phénomène a eu, entre autres, pour conséquence l'abandon (en 2014) de la source Cauvy à Balaruc-les-Bains pour son usage pour l'alimentation en eau potable.

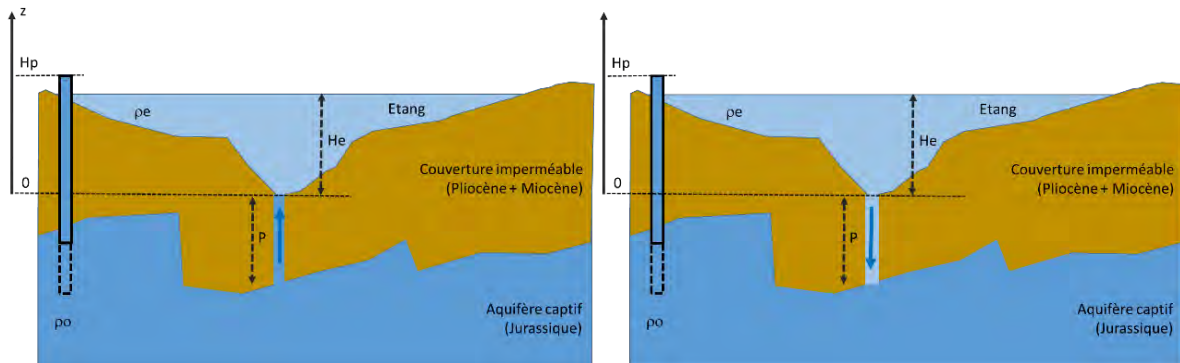
Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017 d'une durée de 5 ans, a pour objectif de mieux comprendre la structure et le fonctionnement d'un hydrosystème complexe dans le secteur du Bassin de Thau (Hérault) et de développer un outil de gestion des eaux souterraines à l'échelle régionale basé sur un modèle hydrogéologique 3D distribué (code Marthe). Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème, sur un territoire soumis : i) à des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) à la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme les phénomènes d'intrusion d'eau marine) ; iii) à la complexité du comportement des différents réservoirs. Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau. 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 par les partenaires opérationnels.

Ce rapport constitue le livrable L11B du projet DEM'EAUX THAU : il décrit le mécanisme d'inversac ainsi que les exercices de modélisation mis en œuvre grâce aux nouvelles données acquises sur l'inversac de 2020-2022 qui s'est déroulé entre le 27 novembre 2020 et le 14 mars 2022.

Ces informations de nature hydrogéologique ont permis de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de l'inversac ainsi que de proposer différentes approches de modélisation mettant en relation les conditions hydrologiques et hydrogéologiques (basses eaux et hautes eaux de la lagune de Thau et de l'aquifère jurassique) avec le fonctionnement de la source de la Vise en période dite normale et en période d'inversac.

Le mécanisme de mise en place de l'inversac est expliqué par des conditions de gradient hydraulique de charge, corrigées de la densité de l'eau, fluctuantes au cours du cycle hydrologique schématisé sur l'illustration ci-dessous. 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 sont peu élevés alors que les niveaux dans l'aquifère sont hauts. Ce mécanisme met en évidence l'importance de ces variables que sont la hauteur d'eau dans la lagune, la hauteur piézométrique dans l'aquifère ainsi que la salinité de la lagune et de l'aquifère pour une surveillance future du phénomène.



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. 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 cet indicateur permettra d'identifier les risques d'inversac. Nous recommandons de poursuivre ce suivi à un pas de temps fin (horaire). Cet indicateur a été enrichi par la prise en compte de changements de stratégie de pompage autour de la source de la Vise.

Les éléments de compréhension qui sont à notre disposition à ce jour permettent de mettre en évidence les rôles joués par la hauteur d'eau dans l'étang et par la piézométrie dans l'aquifère du Jurassique lors de la mise en place d'un inversac. La variable qui semble la plus impactante vis-à-vis du risque de déclenchement du phénomène d'inversac est la variable H_e (cf. illustration ci-dessus) en raison des variations rapides et importantes (jusqu'à +0.5 m) qui peuvent être observées en quelques heures sur la lagune de Thau. En contexte de haut niveau de lagune, on montre qu'une hauteur d'eau dans l'aquifère autour de 2.1 m NGF à l'ouvrage P4-Balm permet de garder un niveau d'indicateur élevé ($I_1 = 0.5$ m) et un débit de la Vise de l'ordre de 0.1 m³/s. Dans ce contexte, c'est la hauteur d'eau dans le karst qui apparaît être la variable sur laquelle il faut agir dans le cadre d'une gestion concertée de l'hydrosystème. L'idée en filigrane qui a orienté le travail d'analyse de cette

étude est qu'il serait intéressant de garder des niveaux d'eau élevés dans l'aquifère le plus longtemps possible pour réduire le risque d'inversac en contrôlant la baisse de cette hauteur d'eau en période d'étiage. Ce contrôle pourrait être théoriquement exercé par une réduction volontaire du débit d'exhaure de la source de la Vise ou par injection d'eau à proximité de la Vise voire même par une solution mixte (injection/réduction des débits de la Vise). Ces différentes solutions de remédiation ont été étudiées et évaluées dans cette étude.

D'un point de vue pragmatique, il ressort qu'il conviendrait d'explorer la possibilité d'obturer partiellement la source de la Vise au niveau de sa sortie, à -29.5 m sous le niveau de la lagune pour maintenir des niveaux suffisants dans le karst et ainsi réduire le risque de déclenchement d'un inversac. Les évaluations réalisées dans cette étude sur la base des mesures et de l'utilisation de l'indicateur montrent que le risque d'inversac serait plus limité si les niveaux d'eau dans le karst dans la zone amont (P4-Balm) demeuraient autour de 2 m NGF, soit à proximité de la Vise (ouvrage F4-Hôtel) de l'ordre de 0.8 m NGF, ce qui correspond à une charge de +0.2 m par rapport au niveau d'étiage naturel). Cette augmentation de + 0.2 m des niveaux de l'aquifère ne provoque pas de dommage et de désordres aux structures souterraines (caves...) au sein de la presqu'île. Le dispositif d'obturation de la Vise devrait être ajustable/modulable de façon à être en mesure de contrôler le niveau piézométrique de la nappe du Jurassique dans la presqu'île de Balaruc. En effet, une obturation complète de l'exutoire principal provoquerait probablement une remontée trop importante du niveau de la nappe, induisant une inondation de structures souterraines (caves...), ceci pourra être évalué ultérieurement par modélisation à l'aide du modèle hydrogéologique 3D. Dès lors, l'obturateur pourrait être couplé au système de mesure du niveau piézométrique de façon à automatiser le degré d'ouverture de l'obturateur en fonction de la hauteur piézométrique.

En l'absence de dispositif de réduction de débit de la Vise, l'autre solution pour maintenir des niveaux d'eau élevés dans le karst serait la recharge artificielle (ou maîtrisée) de l'aquifère à proximité de la Vise par injection d'eau dans un ouvrage conçu spécifiquement pour cet usage. Dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau, les investigations réalisées sur l'ouvrage DemT1 de la plateforme expérimentale ont montré que le forage intercepte une zone de fracture/drain en connexion avec la source de la Vise située à environ 310 m. Sur la base des modèles qui ont été développés pour simuler les résultats des tests de pompage, une évaluation de la réponse hydraulique de l'aquifère a été réalisée pour différentes configurations de débit d'injection. Ces simulations ne tiennent pas compte des effets densitaires (fluctuation de la densité de l'eau en fonction de sa température et salinité).

Dans une seconde approche, ces mêmes modèles ont été utilisés en considérant la possibilité d'une réduction du débit d'exhaure de la source à l'aide d'un système de vannage/contrôle du débit de la Vise (+ solution mixte injection et réduction du débit de la Vise).

En conclusion, une solution de remédiation basée sur une réduction/vannage du débit d'exhaure de la source de la Vise asservi à l'évolution de la piézométrie de l'aquifère apparaît comme la solution la plus pragmatique à tester sur le long terme. En contexte très déficitaire de précipitation et donc de recharge de l'aquifère, une solution de remédiation mixte consistant à injecter de l'eau douce par forage couplé à une réduction des débits de la source de la Vise pourrait s'avérer une solution transitoire intéressante pour réduire le niveau de risque de déclenchement d'un inversac. Cette dernière solution basée sur un débit d'injection soulève deux problèmes techniques majeurs. Le premier consiste à réaliser et dimensionner un ouvrage d'injection interceptant le même conduit karstique que celui de la source, ou un conduit bien connecté, et le second suppose que l'on puisse acheminer d'importants volumes d'eau douce pour assurer l'injection. Pour une durée de 20 jours et une injection à 100 m³/h, cela représente 48 000 m³.

Finalement, la solution technique qui permettrait de moduler le débit de la source de la Vise en fonction de la piézométrie (et les aménagements associés) demanderait à être étudiée et testée de façon détaillée.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Contexte et réseau d'observation	15
2.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	15
2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION	19
2.3. CHRONIQUES DU RÉSEAU D'OBSERVATION.....	22
3. Mécanisme d'inversac : exemple de 2020-2022.....	25
3.1. HISTORIQUE DES INVERSACS DE LA VISE	25
3.2. DESCRIPTION DE L'INVERSAC DE 2020-2022	25
3.3. CONTEXTE HYDRO-CLIMATIQUE DE L'INVERSAC DE 2020-2022	26
3.3.1. Caractérisation de l'indice de sécheresse de l'hydrosystème à l'aide de l'Index standardisé des précipitations (SPI)	26
3.3.2. Caractérisation de l'indice de sécheresse de l'aquifère à l'aide l'indice standardisé des eaux souterraines (SGI).....	28
3.3.3. Caractérisation du niveau d'eau de la lagune de Thau	30
3.3.4. Synthèse	32
3.4. EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE	32
3.5. RÉPONSES PIÉZOMÉTRIQUES SUITE À L'INVERSAC 2020-2022	34
3.5.1. Description des chroniques de mesures	34
3.5.2. Interprétation	35
3.6. RÉPONSES PHYSICO-CHIMIQUES SUITE À L'INVERSAC 2020-2022	37
3.6.1. Observations	37
3.6.2. Caractérisation des propriétés hydrodispersives dans le secteur de la Vise	39
3.7. VOLUMES D'EAU SAUMATRE INFILTRÉS DANS L'AQUIFÈRE PENDANT L'INVERSAC 2020-2022	42
4. Modélisation de l'inversac	45
4.1. MODÉLISATION ANALYTIQUE DU REBOND PIÉZOMÉTRIQUE SUITE À L'INVERSAC DE 2020-2022	45
4.1.1. Solutions analytiques	45
4.1.2. Résultats	45
4.2. MODÉLISATION ANALYTIQUE DES DÉBITS MESURÉS À LA VISE	48
4.2.1. Solutions analytiques	48
4.2.2. Variables utilisées	49
4.2.3. Résultats en situation normale lorsque $H_p > (\rho_e/\rho_0)H_e$	51
4.2.4. Résultats en période d'inversac lorsque $H_p < (\rho_e/\rho_0)*(H_e + P) - P$	58
4.2.5. Synthèse	60

4.3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS ET DU TRANSPORT DE SEL	60
4.3.1. Description du modèle	60
4.3.2. Résultats de la simulation	61
5. Premiers résultats après l'arrêt d'un phénomène (inversac 2020-2022)	63
5.1.1. Évolution du débit et de la piézométrie au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (inversac 2020-2022)	63
5.1.2. Évolution de la conductivité électrique des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (Inversac 2020-2022)	64
5.1.3. Évolution de la température des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (Inversac 2020-2022)	67
5.1.4. Conclusion préliminaire	68
6. Surveillance et gestion de l'inversac	69
6.1. SURVEILLANCE ET DÉFINITION D'INDICATEURS D'ALERTE	69
6.1.1. Situation normale : indicateur de risque d'inversac	69
6.1.2. Situation d'inversac : indicateur de situation d'arrêt d'inversac	78
6.1.3. Surveillance	81
6.2. ANALYSE PROSPECTIVE DE L'EFFET D'UNE AUGMENTATION DU NIVEAU MOYEN DE LA LAGUNE SUR L'OCCURRENCE DU DÉCLENCHEMENT DU PHÉNOMÈNE D'INVERSAC	82
6.3. REMÉDIATION	83
6.3.1. Injection d'eau dans l'aquifère à proximité de la Vise	83
6.3.2. Diminution de la salinité de la lagune	87
6.3.3. Obturation de la source de la Vise	89
7. Conclusion	93
8. Bibliographie	97

Liste des illustrations

Illustration 1 : Coupe géologique interprétative nord-sud de la zone d'étude	15
Illustration 2 : Carte de localisation de la zone d'étude	16
Illustration 3 : Bloc diagramme conceptuel présentant l'organisation présumée des différents types d'eau au sein de la presqu'île de Balaruc	17
Illustration 4 : Coupe hydrogéologique interprétative révisée (projet DEM'EAUX Thau)	18
Illustration 5 : Coupe hydrogéologique interprétative simplifiée au droit de la source de la Vise (cf texte) ..	19
Illustration 6 : Caractérisation des différentes zones des compartiments amont et aval au sein de l'entité A.V.I.C (Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy)	20
Illustration 7 : Carte de localisation des ouvrages instrumentés (Focus sur la presqu'île de Balaruc, Légende : les rectangles définissent approximativement les zones hydrogéologiques)	21
Illustration 8 : Évolution piézométrique dans le compartiment « amont » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac)	23

Illustration 9 :	Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur la zone 2 (cf. Illustration 6)	23
Illustration 10 :	Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur la zone 3 (cf. Illustration 6)	24
Illustration 11 :	Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur les zones 3 et 4 (cf. Illustration 6).....	24
Illustration 12 :	Évolution des paramètres physico-chimiques et conditions hydrologiques de l'étang et de la source de la Vise au moment de l'inversac de 2020	26
Illustration 13 :	Caractérisation des périodes de sécheresse par l'index standardisé des précipitations (SPI)	27
Illustration 14 :	Observations et simulation de la chronique piézométrique de l'ouvrage CGE-Tennis (BSS002JEHM) à l'aide de Gardenia (cf. rapport L11A, BRGM/RP-71757-FR) et calcul du SGI (Bloomfield et Marchant, 2013) avec Pastas (Collenteur et al, 2019)	28
Illustration 15 :	Évolution du SGI pour l'ouvrage CGE-Tennis et report des dates des inversacs.....	29
Illustration 16 :	Évolution de la hauteur d'eau de la lagune de Thau à proximité de la Vise.....	30
Illustration 17 :	Fonction de répartition (LogNormal) des hauteurs d'eau de la lagune (2007-2021) et éléments de statistiques descriptives des phénomènes d'inversac	31
Illustration 18 :	Évolution du niveau piézométrique au sein de l'aquifère jurassique au forage F4-La Balme (orange), du niveau de l'étang de Thau (vert), de la pluviométrie (bleu) et du débit de la Vise (noir).....	32
Illustration 19 :	Coupe hydrogéologique 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise. Schématisation des écoulements (a) en conditions normales (b) en cours d'inversac.....	33
Illustration 20 :	Évolution des niveaux d'eau observés après l'inversac de 2020 (t=0 le 28 novembre 2020 à 9h40)	34
Illustration 21 :	Comparaison des réponses piézométriques observées lors des inversacs de 2008, 2010, 2014 et 2020 : Exemple du forage F5 (Thermes).....	35
Illustration 22 :	Coupe 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise en condition d'inversac avec la localisation de deux piézomètres F1 et F2 implantés à deux profondeurs différentes	36
Illustration 23 :	Relations entre les rebonds piézométriques observés et simulés (Eq 2) pour trois hypothèses de profondeur P du conduit karstique (en haut à gauche : profondeur P = 50 m ; en bas au centre : profondeur P = 70 m ; en haut à droite : profondeur P = 90 m).....	37
Illustration 24 :	Tableau de synthèse des caractéristiques des piézomètres influencés par le rebond piézométrique induit par l'inversac de 2020. * voir sa définition en Illustration 22. ** variable d'ajustement pour caler la relation de l'équation 2.....	37
Illustration 25 :	Variations de températures enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseaux de mesure proche de la source de la Vise	38
Illustration 26 :	Variations des conductivités électriques de l'eau enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseaux de mesure proche de la source de la Vise	39
Illustration 27 :	Courbes d'arrivées du sel simulée (rouge) et observée (bleu) au point d'observation du forage F6 situé dans un rayon de 300 m de la source de la Vise et à 61m de profondeur....	41
Illustration 28 :	Courbes d'arrivées du sel simulée (rouge) et observée (bleu) au point d'observation du forage DEM T1 situé dans un rayon de 305 m de la source de la Vise et à 131 m de profondeur.....	41
Illustration 29 :	Synthèse des paramètres du modèle de transport unidimensionnel utilisé pour simuler les évolutions de conductivité électrique mesurées dans les ouvrages.....	42
Illustration 30 :	Intercomparaison des réponses hydrauliques mesurées lors des Inversac de 2008,2010,2014 et 2020 (Exemple du Forage F6 : BSS002JDXA)	43
Illustration 31 :	Volume et masse de chlorure absorbés par le karst par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise : Bilans des 4 derniers phénomènes d'inversac	43

Illustration 32 :	Tableau de description des solutions analytiques utilisées pour modéliser le rebond piézométrique observé dans l'aquifère du Jurassique après le démarrage d'un inversac.....	45
Illustration 33 :	Tableau des paramètres utilisés dans la solution 2 pour simuler le rebond piézométrique suite à l'inversac de 2020	46
Illustration 34 :	Inversac de 2020 - évolution en fonction du temps des variations piézométriques observées et simulées au moyen de la solution 2 aux forages proches F4, F6 (en haut) et éloignés S12 et CGE-Tennis (en bas)	47
Illustration 35 :	Schéma conceptuel interprétatif et coupes hydrogéologiques verticales au droit de la Vise.	48
Illustration 36 :	Évolution de la salinité (en unité PSU) de la lagune de Thau (Ifremer) et de la densité estimée à partir de la salinité (zoom en bas sur la période 2016-2021).....	50
Illustration 37 :	Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio ρ_e/ρ_0 et les variations piézométrique du piézomètre amont CGE-Tennis (BSS002JEHM).....	52
Illustration 38 :	Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio ρ_e/ρ_0 et les variations piézométrique du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE)	53
Illustration 39 :	Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune et une chronique synthétique calculée par une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée au sein de la presqu'île de Balaruc	54
Illustration 40 :	Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune et une chronique synthétique calculée par une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée au sein de la presqu'île de Balaruc et à Sète	55
Illustration 41 :	Comparaison des résultats des simulations des débits de la Vise pour différentes configurations du paramètre C (A fixé à 20 m ² /s) en considérant les variations de niveau de la lagune et les variations piézométriques du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE)	56
Illustration 42 :	Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio ρ_e/ρ_0 , les variations piézométriques du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE) et l'estimation des rabattements provoqués par les forages situés au voisinage de la Vise	57
Illustration 43 :	(a) Évolution de la piézométrie mesurée à P4-Balm au cours de l'inversac 2020-2022 (28/11/2020 au 13/03/2022). (b) Évolution de l'amplitude de la perturbation piézométrique mesurée à P4 Balm par rapport à la situation pré-inversac.	58
Illustration 44 :	(a) débits mesurés et simulés à la Vise lors de l'inversac 2020-2022, (b) chroniques mesurées des niveaux d'eau (aquifère et étang) ; (c) évolution du ratio des masses volumique (ρ_e/ρ_0) de la lagune de Thau au droit de la Vise (calculé à partir des suivis de conductivité et température de l'eau) et de l'eau du karst (supposé constante = 999 kg/m ³)..	59
Illustration 45 :	Schéma (coupe hydrogéologique 2D verticale) du modèle numérique mis en œuvre.....	61
Illustration 46 :	Évolution des niveaux d'eau et débit simulés par le modèle numérique.....	62
Illustration 47 :	Évolution des niveaux d'eau simulés en fonction de la distance au conduit karstique (en bleu : situation normale ; en rouge : situation d'inversac)	62
Illustration 48 :	Évolution du débit mesuré à la Vise entre le 01 février 2022 et le 19 avril 2022. La piézométrie mesurée au sein de la presqu'île de Balaruc, le niveau de la lagune ainsi que la température de l'eau mesurée à -29 m de profondeur dans la Vise sont également reportés.	63
Illustration 49 :	Évolution de la conductivité électrique des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc.	65
Illustration 50 :	Évolution de la conductivité électrique des eaux (focus sur les forages des thermes)	65
Illustration 51 :	Évolutions de la hauteur d'eau, du débit de pompage et de la température et conductivité électrique des eaux pompées aux forages F9, F14 et F5 des thermes	66
Illustration 52 :	Évolutions de la température de l'eau des ouvrages F4, F5, F6 et F14. Les évolutions des débits et de la température de l'eau mesurée à la Vise (-29.5 m) sont également reportés..	68

Illustration 53 : Inversac 2020 : évolution piézométrique (P4 La Balme) et de la cote de la lagune ainsi que du rapport re/ro estimé. Évolutions de l'indicateur I1 calculé avec HP à P4 La Balme (période de juillet 2020 à mars 2021)	71
Illustration 54 : Proposition des seuils de vigilance en fonction de la valeur de l'indicateur. Situation du système hydrogéologique juste avant l'inversac du 28/11/2020	72
Illustration 55 : Paramètres lors du déclenchement de l'inversac de 2020	72
Illustration 56 : Évolutions de l'indicateur et du débit modélisé de la Vise (en contexte de fonctionnement « normal ») pour différentes configurations hydrogéologiques. [A] évolutions en fonction de la cote de la lagune de Thau pour une valeur donnée de HP et pepo. [B] évolutions en fonction de la charge piézométrique HP pour une valeur donnée de He et pepo.	73
Illustration 57 : Tableau des données disponibles pour les variables de l'indicateur I1 lors des inversacs récents (code couleur selon la disponibilité et qualité des données)	74
Illustration 58 : Évolution de l'indicateur I1 et des débits de la Vise calculés à l'aide des variables HP, He et pepo.....	75
Illustration 59 : Présentation du prototype de l'outil (V0) permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I ₁ . (exemple de situation en fin d'été estival)	76
Illustration 60 : Présentation du prototype de l'outil (V0bis) permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I ₁ en tenant compte de l'effet des pompes. Dans l'exemple, le critère « actuel » représentait la situation de l'hydrosystème dans les heures qui précédaient l'inversac.	77
Illustration 61 : Évolution de l'indicateur I ₂ et des débits de la Vise calculés à l'aide des variables HP, He et pepo.....	79
Illustration 62 : Évolutions de l'indicateur et du débit modélisé de la Vise (en contexte d'inversac) pour différentes configurations hydrogéologiques. [A] évolutions en fonction de la cote de la lagune de Thau pour une valeur donnée de HP et pepo. [B] évolutions en fonction de la charge piézométrique Hp pour une valeur donnée de He et re/ro.	80
Illustration 63 : Présentation du prototype de l'outil (V0) permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac	81
Illustration 64 : Simulation de l'évolution de l'indicateur et du débit de la Vise dans un contexte d'augmentation du niveau de la lagune (+0.2 m) par rapport à la situation actuelle (2007-2022)	82
Illustration 65 : Coupe hydrogéologique verticale 2D. Schématisation d'un dispositif d'injection d'eau (recharge artificielle ou maîtrisée) à proximité de la source de la Vise	84
Illustration 66 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un orage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DMT1 avec les propriétés de DMT1. Trois scénarios de débit (200, 400 et 600 m ³ /h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte). Figure du haut : impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise et figure du bas : augmentation du débit sortant à la Vise. ...	85
Illustration 67 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un forage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DMT1 avec les propriétés moyennes du Jurassique. Trois scénarios de débit (200, 400 et 600 m ³ /h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte). Figure du haut : impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise et figure du bas : augmentation du débit sortant à la Vise.	86
Illustration 68 : Évolution de la salinité (PSU) de la lagune au point d'observation 104P0001 (Ifremer).....	87
Illustration 69 : Évolution de la variable He de l'indicateur en fonction de la salinité et de la température de la lagune.....	88
Illustration 70 : Coupes hydrogéologiques verticales 2D – Schématisation de possibles équipements pour (a – à gauche) réduire l'impact d'un inversac et (b – à droite) réduire le risque de démarrage d'un inversac.....	89

Illustration 71 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un forage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DENT1 avec les propriétés moyennes du Jurassique. Impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise. Quatre scénarios de débit (100, 200, 400 et 600 m³/h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte), pour trois scénarios de réduction du débit à la source. Haut : modèle 1 (xf = 100 m) et bas : modèle 2 (xf = 310 m).91

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des points suivis et report de leur zone hydrogéologique (cf.Illustration 6).....	22
Tableau 2 : Estimation des SPI de la zone d'étude au moment du déclenchement des inversacs de la période récente (depuis 1993)	28

Liste des annexes

Annexe 1 : Détail sur le réseau d'observation.....	99
Annexe 2 : Statistique descriptive de la chronique de salinité de l'étang.....	103

1. Introduction

Les ressources en eau souterraine des calcaires karstiques du Pli Ouest de Montpellier présentent un intérêt majeur pour le territoire, que ce soit pour l'alimentation en eau potable (ville de Sète, SIAEP Balaruc-Frontignan, SBL), mais également pour le développement économique, avec en particulier l'activité conchylicole au niveau de l'étang, ainsi que pour le thermalisme sur la presqu'île de Balaruc-les-Bains (1^{ère} station thermale en France avec près de 53 000 curistes en 2019), et l'irrigation. 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, située dans l'étang de Thau. Depuis la fin des années 1960, 7 phénomènes d'inversac ont été détectés ; le dernier en date a débuté le 28 novembre 2020, de manière fortuite, dans le cadre de ce projet ce qui constitue une occasion unique d'étudier de façon détaillée le phénomène qui s'est terminé le 14 mars 2022 après 471 jours. 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. Ce phénomène a eu entre autre pour conséquence l'abandon (en 2014) de la source Cauvy à Balaruc-les-Bains pour son usage pour l'alimentation en eau potable.

Le projet de recherche DEM'Eaux Thau, débuté en juillet 2017 d'une durée de 5 ans, a pour objectif 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 à l'échelle régionale basé sur un modèle hydrogéologique 3D distribué (code Marthe). Ce projet scientifique pluridisciplinaire implique la caractérisation de la géologie, l'hydrogéologie et la géochimie de cet hydrosystème, sur un territoire soumis : i) à des enjeux économiques importants (croissance démographique, thermalisme, conchyliculture, pêche, tourisme) ; ii) à la fragilité de l'équilibre entre les différentes ressources en eaux souterraines (comme les phénomènes d'intrusion d'eau marine) ; iii) à la complexité du comportement des différents réservoirs. Ce projet rassemble le BRGM (coordinateur du projet - responsable des tâches hydrogéologie, modélisation hydrogéologique), Géosciences Montpellier (responsable de la tâche géologie/construction du modèle géologique), HydroSciences Montpellier (responsable de la tâche géochimie), l'entreprise Synapse Informatique (responsable de l'élaboration de l'outil de gestion) et le SMBT futur destinataire de l'outil de gestion des eaux souterraines de l'hydrosystème de Thau. 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 par les partenaires opérationnels.

Le dispositif de mesures mis en place dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau a permis de suivre en détails la mise en place et les impacts hydrogéologiques de l'inversac de 2020-2022. Ces données permettent de mieux décrire le mécanisme d'inversac et son fonctionnement.

Le présent rapport constitue le livrable L11B du projet DEM'EAUX Thau. Il rappelle le réseau d'observation hydrogéologique mis en place en partie dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau (§ 2).

Il décrit ensuite le mécanisme d'inversac et les réponses piézométriques et hydrochimiques (conductivités électriques) de l'aquifère impacté (§ 3) . La section 4 présente d'une part des modélisations analytique et numérique des changements de charges induit par le phénomène et d'autre part une caractérisation des processus de transport de sel à l'aide d'un modèle analytique. Les premiers résultats de suivi de fin d'inversac sont décrits en section 5. Enfin, des recommandations en terme de surveillance et de gestion du phénomène sont proposées (§ 6).

2. Contexte et réseau d'observation

2.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le contexte hydrogéologique et les schémas conceptuels de structure et de fonctionnement de la zone d'étude sont présentés dans le rapport BRGM/RP-68483-FR sur la base de la synthèse des connaissances existantes. Retenons que le Jurassique Supérieur, fortement faillé et karstifié, constitue le siège des principaux aquifères karstiques de la zone d'étude. Il affleure largement dans l'arrière-pays, sur le Causse d'Aumelas et la montagne de la Moure, sur le massif de la Gardiole et sur les pointements que l'on retrouve au niveau de la presqu'île de Balaruc ainsi que sur le Mont Saint-Clair à Sète. Ces massifs constituent une zone de recharge des aquifères par les précipitations. Les failles principales correspondent au chevauchement de Montpellier (nord du secteur) et à la faille normale de Nîmes (sud du secteur). Les accidents majeurs d'orientation nord-nord-est/sud-sud-ouest sont accompagnés d'accidents secondaires globalement orthogonaux. Les accidents chevauchants profonds pourraient constituer des vecteurs préférentiels pour la remontée des eaux thermales vers la surface. Il est supposé que le pendage de ces accidents diminue avec la profondeur. **Le travail réalisé pour la construction d'un modèle géologique 3D (BRGM/RP-70789-FR) a permis de mettre en évidence la présence d'un chevauchement traversant possiblement l'étang de Thau (nommé Faille de Thau, Illustration 1).** Cet accident correspondrait au prolongement du chevauchement traversé par le forage pétrolier de Valensac dans la vallée de l'Hérault.

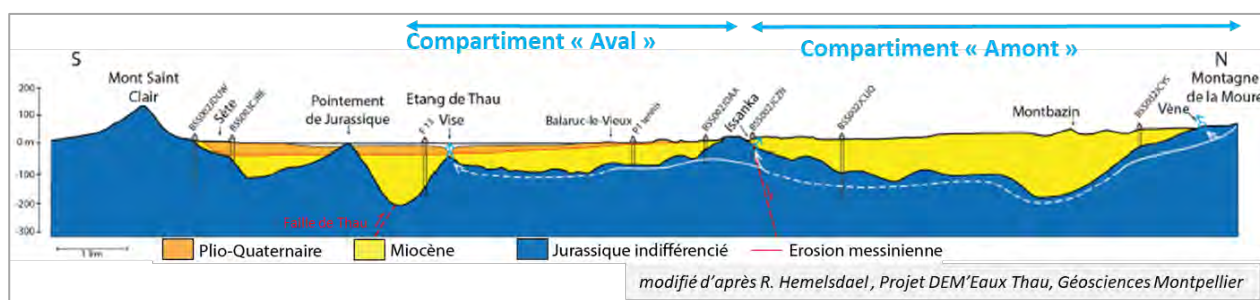


Illustration 1 : Coupe géologique interprétative nord-sud de la zone d'étude

L'écoulement général de l'aquifère au sein des calcaires jurassiques s'organise selon une direction nord-ouest/sud-est (Illustration 1 et Illustration 2). Un axe de drainage, démontré par essais de traçages, apparaît entre la source de trop-plein de la Vène et la source d'Issanka. On peut noter que globalement les directions d'écoulement générales mises en évidence sur les différentes cartes piézométriques ne varient pas en fonction des conditions hydrologiques. L'existence des pertes du Coulazou dont le bassin versant s'étend au-delà de la limite de la masse d'eau implique la prise en compte du bassin versant amont du Coulazou dans la délimitation de l'impluvium karstique de « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy » estimé à 200 km². Ces pertes ont lieu au sein des calcaires jurassiques entre la limite nord de l'entité (chevauchement de Montpellier) et l'entrée du cours d'eau sur la molasse miocène. L'émergence temporaire de la Vène et des Oulettes (trop-pleins) et plus au Sud, les sources d'Issanka et, plus en aval encore, la source sous-marine de la Vise constituent les principaux exutoires de cette entité karstique « Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy ». La partie occidentale du massif de la Gardiole entre Gigan et Frontignan est drainée principalement vers la source Cauvy et la source d'Ambressac à Balaruc-Les-Bains et également par la source sous-marine de la Vise.

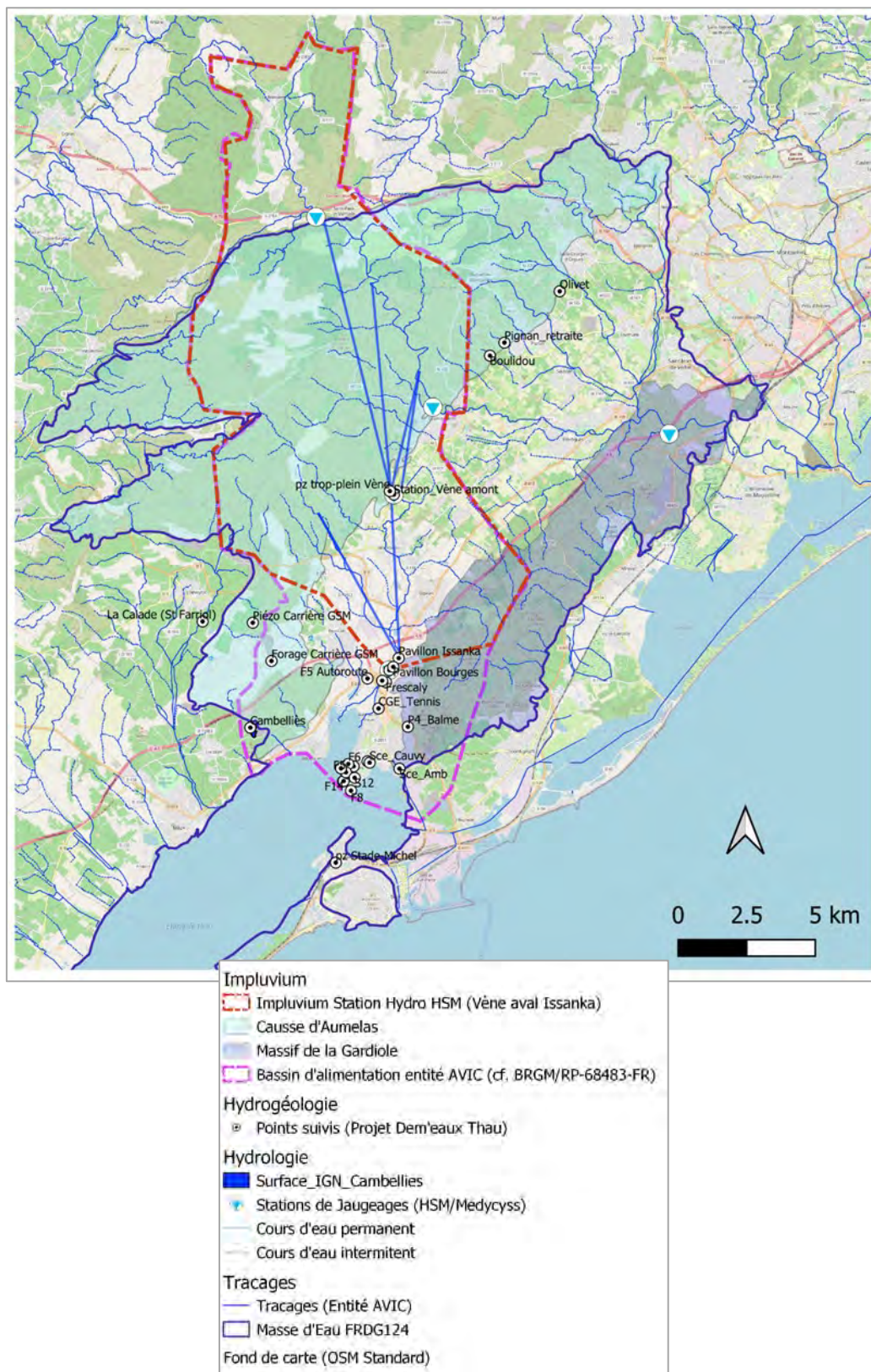


Illustration 2 : Carte de localisation de la zone d'étude

La presqu'île de Balaruc constitue le lieu de convergence des 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. En contexte de fonctionnement dit « normal » (hors inversac), la source de la Vise est l'exutoire le plus aval du système hydrogéologique. Elle constitue naturellement le lieu de convergence des eaux karstiques froides en provenance des Causses d'Aumelas et de la Gardiole et également d'une part d'eaux thermales minéralisées d'origine profonde.

L'actualisation du contexte géologique réalisée dans le cadre de DEM'EAUX Thau ([BRGM/RP-70789-FR](#)) laisse suggérer que les eaux thermales d'origine profonde transitent par la faille de Thau (Illustration 1, Illustration 3 et Illustration 4) et non au droit de la Vise comme conceptualisé antérieurement (Illustration 5).

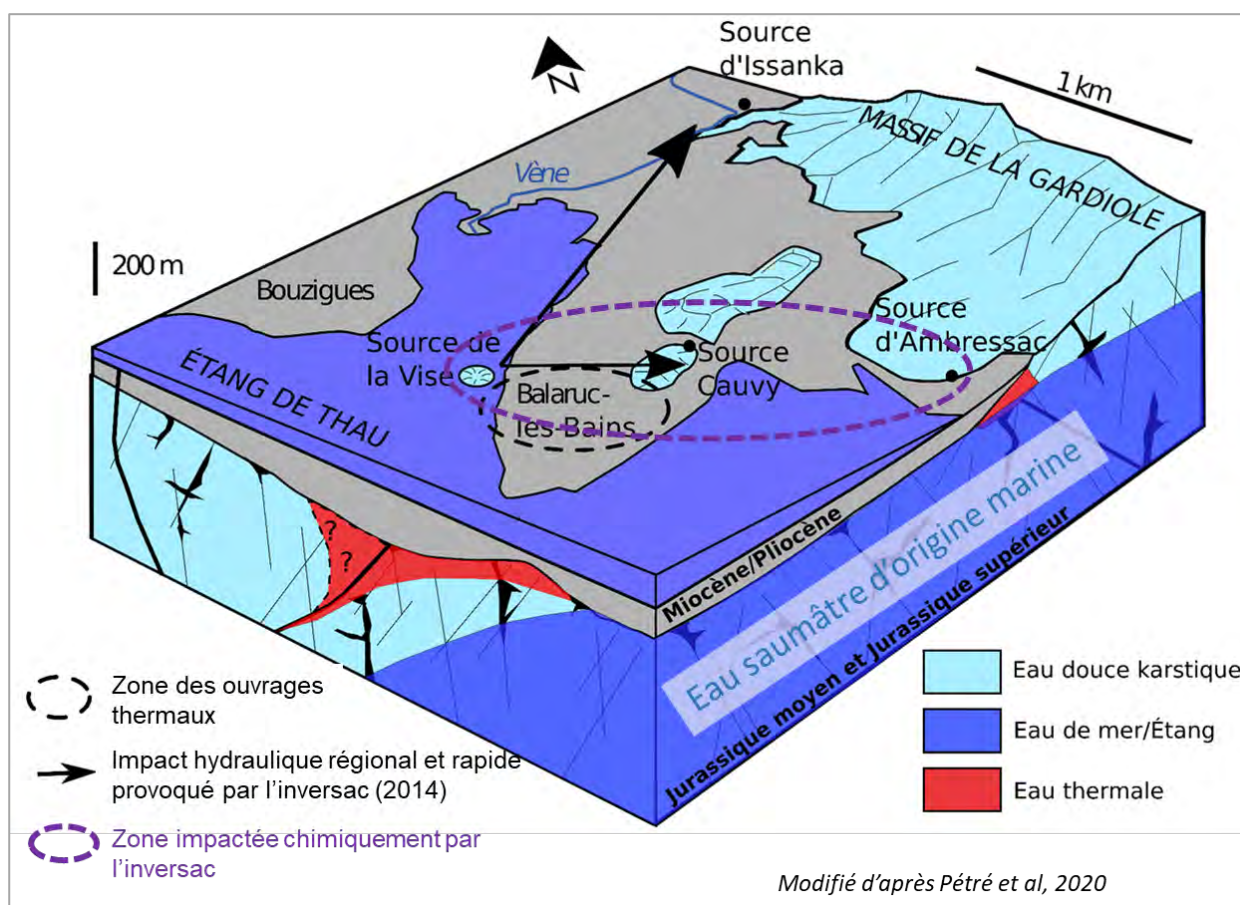


Illustration 3 : Bloc diagramme conceptuel présentant l'organisation présumée des différents types d'eau au sein de la presqu'île de Balaruc

Les eaux thermales qui sont retrouvées en sub-surface au toit du Jurassique Supérieur occupent au sein de l'aquifère récepteur fortement karstifié une extension spatiale vraisemblablement réduite (compte tenu des informations des forages disponibles sur la presqu'île de Balaruc). Selon Tessier (1988), la géométrie de la « bulle thermique et minérale » est conditionnée par le toit imperméable (formation peu perméable du Miocène) et la présence sous-jacente et latérale d'eaux froides, douces et salées. Historiquement l'exutoire des eaux thermales de Balaruc se situait à proximité du point S12 (cf. description [BRGM/RP-68483-FR](#)). Les contrastes de densité des différents types d'eau souterraine de Balaruc donnent lieu à l'existence de plusieurs interfaces hydrauliques se déplaçant suivant l'importance respective des différentes charges hydrauliques mises en jeu (pompages, niveau de l'étang, recharge par les précipitations).

Cette configuration hydrogéologique singulière a été confirmée et illustrée à l'aide des investigations réalisées en 2007 sur le forage carotté F13 réalisé par les thermes. Ces différents réservoirs sont en interaction les uns avec les autres selon des processus complexes qui sont étudiés dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau.

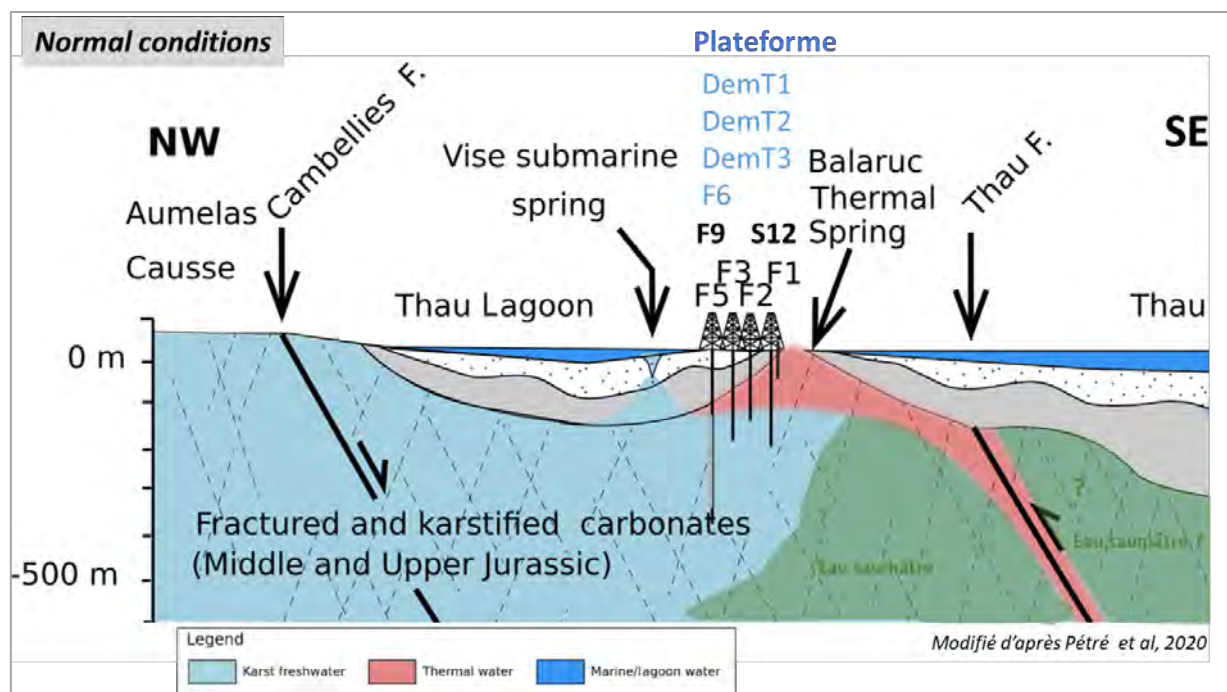


Illustration 4 : Coupe hydrogéologique interprétative révisée (projet DEM'Eaux Thau)

Ces interactions sont à l'origine de conflits d'usage, de problèmes de quantité d'eau et de dégradation de la qualité des eaux souterraines notamment par des phénomènes d'intrusion d'eau saumâtre par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise. Lors de ces phénomènes temporaires dits « d'inversac », qui peuvent durer plusieurs mois (plus de 6 mois en 2010, près de 6 mois en 2014, plus de 15 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. Ce phénomène a pour conséquence de provoquer une modification des paramètres physico-chimiques des eaux de l'hydrosystème, observée au niveau de différents ouvrages sur la presqu'île de Balaruc ([BRGM/RP-64812-FR](#)), notamment sur la source Cauvy qui a dû être abandonnée en 2014 pour son usage d'alimentation en eau potable.

L'amélioration de la compréhension du phénomène d'inversac et des facteurs et mécanismes déclencheurs constitue un enjeu majeur pour une meilleure gestion de la ressource de cette entité hydrogéologique et constitue l'un des verrous scientifiques du projet DEM'Eaux Thau. Le septième phénomène d'inversac depuis les années 1960, qui a débuté le 28 novembre 2020, est spécifiquement étudié dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau. L'étude du phénomène s'appuie sur l'important renforcement du réseau de mesures existant qui intègre notamment les données acquises sur le forage de Sète ([BRGM/RP-68549-FR](#)) et les plateformes expérimentales des forages (DEMT1, DEMT2, et DEMT4)¹ et de la Vise (cf. présentation des plateformes dans le rapport [BRGM/RP-70842-FR](#) qui constitue le livrable L10 du projet).

¹ DEMT1 ([BSS004AXZH](#)) ; DEMT2 ([BSS004AXZJ](#)), DEMT4 ([BSS004CLMU](#))

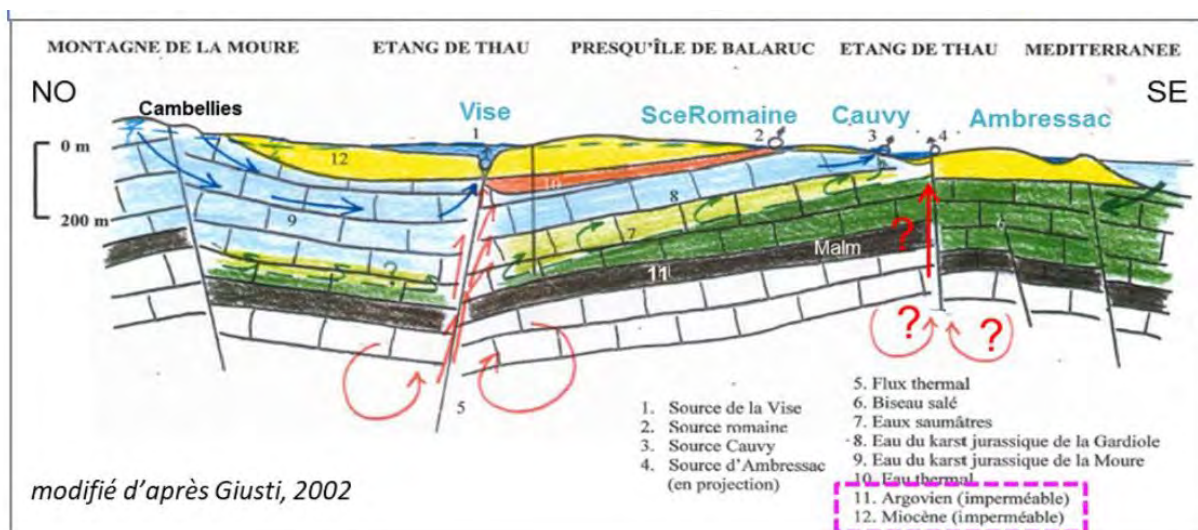


Illustration 5 : Coupe hydrogéologique interprétative simplifiée au droit de la source de la Vise (cf texte)

2.2. RÉSEAU D'OBSERVATION

L'acquisition de données de débit, de conductivité et température de la source sous-marine de la Vise constitue un élément-clé du projet de recherche DEM'EAUX Thau pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique en condition « normale » ou en période « d'inversac ». La plateforme d'observation des trois ouvrages DEMENT1, DEMENT2 et DEMENT4 réalisés à quelques centaines de mètres de la source à proximité immédiate de l'ouvrage existant F6 constitue également un complément expérimental d'exception pour suivre les évolutions physico-chimiques des eaux souterraines à différentes profondeurs. Le détail de ces équipements ainsi que des premières acquisitions de données et leur première interprétation sont présentés dans les rapports [BRGM/RP-69163-FR](#) et [BRGM/RP-70842-FR](#).

Le réseau d'observation des eaux souterraines de la zone d'étude s'appuie également sur 31 ouvrages (cf. liste en annexe) dont la localisation est reportée sur les cartes (Illustration 2 et Illustration 7). Suivant l'axe d'écoulement nord-sud des eaux souterraines, deux compartiments hydrogéologiques ont été distingués (Illustration 6) :

- le **compartiment « Amont »** a pour exutoire principal les sources du champ captant d'Issanka et le trop-plein de la Vène qui déborde en période de crue. Ce compartiment est alimenté par les recharges issues du massif d'Aumelas et la montagne de la Moure. Le fonctionnement hydrogéologique du compartiment amont peut-être décrit à l'aide de 7 ouvrages de mesures (cf. liste des ouvrages Tableau 1) ;
- le **compartiment « Aval »**, situé à l'aval du champ captant, est alimenté par les recharges issues de la partie occidentale du massif de la Gardiole et par la terminaison sud de la montagne de la Moure. Ce compartiment bénéficie également de l'alimentation des flux profonds issus du compartiment amont qui n'ont pas été drainés par la source d'Issanka (Illustration 6). Au sein, du compartiment aval, 2 zones ont été distinguées (zones 2 et 3) d'après les informations issues de l'étude des inversacs de 2010 et 2014 ([BRGM/RP-64812-FR](#)). La zone 3, qui correspond à la partie sud de la presqu'île de Balaruc (cf. Illustration 7, Illustration 10), est influencée hydrauliquement et chimiquement par les phénomènes d'inversac ;
- les variations piézométriques sont principalement contrôlées par le potentiel hydraulique de la Lagune de Thau (cf. [BRGM/RP-70842-FR](#)). La zone 2 (cf. Illustration 7, Illustration 9) apparaît seulement influencée hydrauliquement par les phénomènes d'inversac. La liste des ouvrages associés à chacune de ces zones du compartiment aval est reportée dans le Tableau 1 ;

- au niveau de Sète, une quatrième zone a été définie. Les suivis réalisés sur le forage stade Michel (BSS003CGKO²) notamment lors des tests de pompage de 2019 (cf. BRGM/RP-68483-FR) ne permettent pas de le rattacher au compartiment aval de l'entité A.V.I.C.

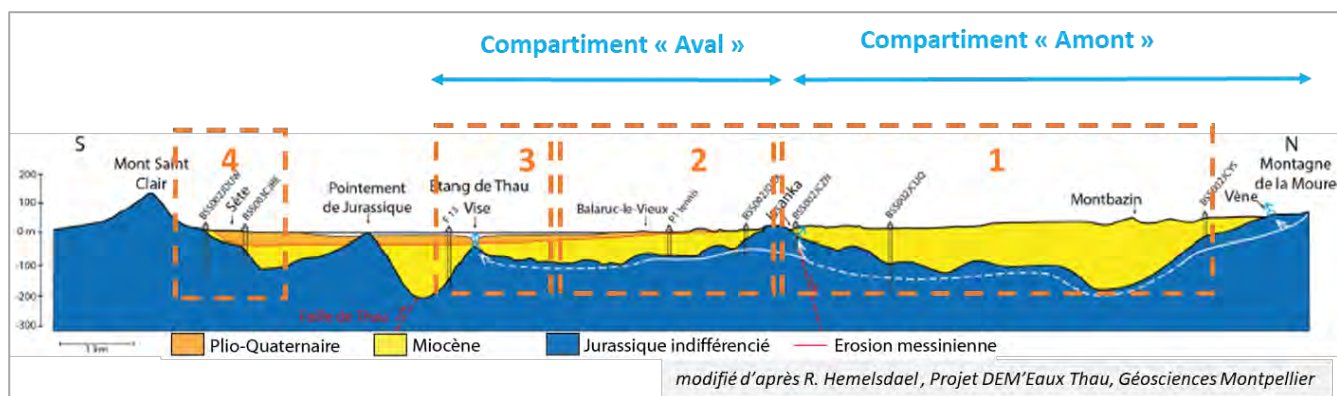


Illustration 6 : Caractérisation des différentes zones des compartiments amont et aval au sein de l'entité A.V.I.C (Aumelas-Vène-Issanka-Cauvy)

² Le forage « Stade Michel » réalisé dans le cadre du projet DEM'Eaux Thau, a été exécuté entre novembre et décembre 2017 par la société MASSE au Marteau Fond-de-Trou (MFT), avec l'assistance de la société ANTEA. Il a été foré à l'air dans les calcaires jurassiques et a atteint 134 m de profondeur. L'ouvrage a été équipé en tubages pleins cimentés de 0 à 111 m de profondeur, il est trou nu du 111 m à 134 m de profondeur. Le forage « Stade Michel » a fait l'objet de pompages d'essai et de diagraphies début 2018, est équipé d'un capteur PTEC depuis juillet 2019.

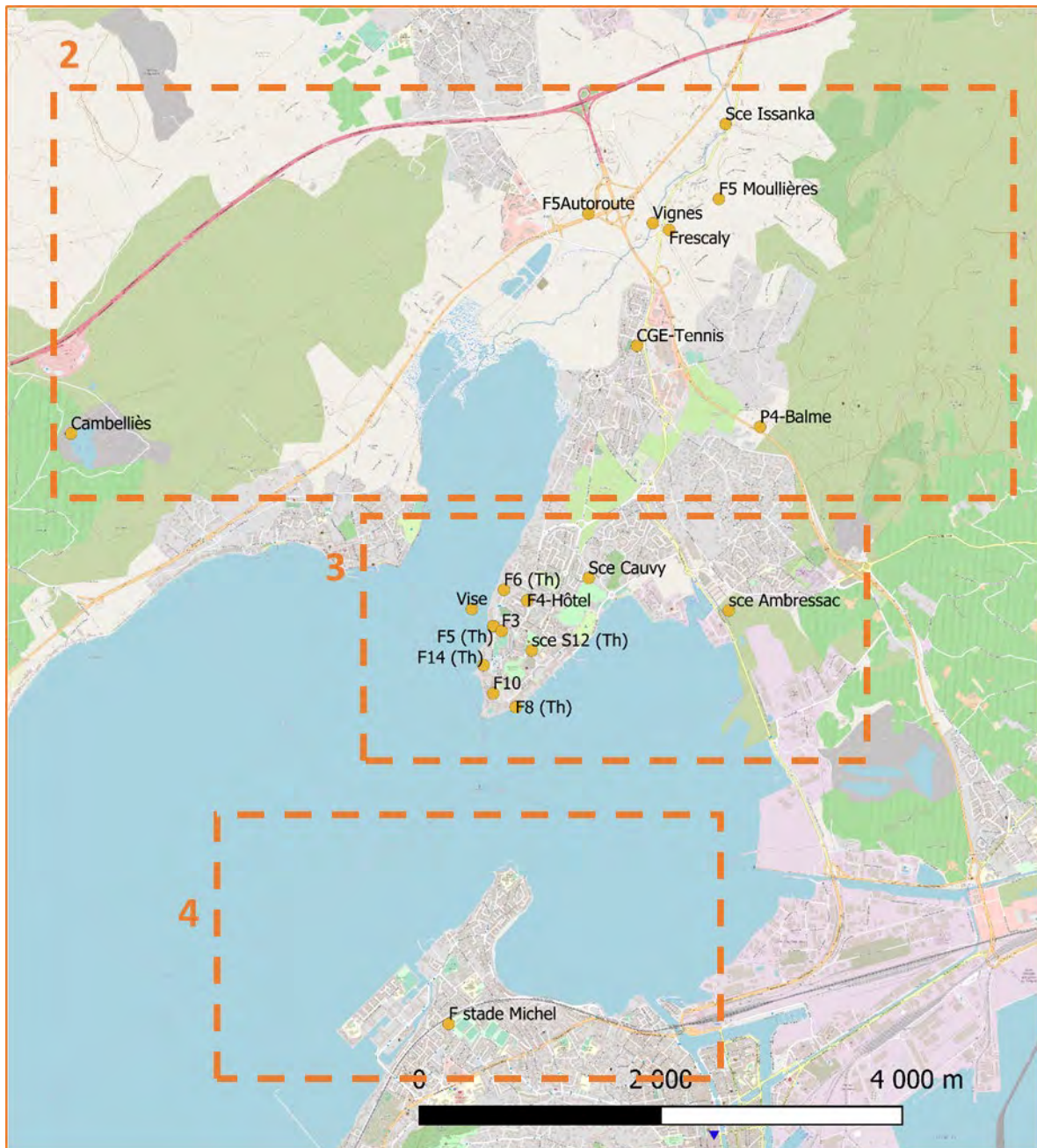


Illustration 7 : Carte de localisation des ouvrages instrumentés (Focus sur la presqu'île de Balaruc, Légende : les rectangles définissent approximativement les zones hydrogéologiques)

Code BSS	Abreviation	x L93	y L93	Zone	Réseau/producteur
BSS002JDBC	pz trop-plein Vène	756188	6270819	1	BRGM/AFB
BSS002JCUL	Pavillon Issanka	756512	6264734	1	SETE/SUEZ; BRGM/Demeaux depuis 2019
BSS002JCZF	Pavillon Bourges	756313	6264415	1	SETE/SUEZ; BRGM/Demeaux depuis 2019
BSS002JCSQ	Forage Carrière GSM	751878	6264630	1	SMBT
BSS002PYCD	Piézo Carrière GSM	751198	6266023	1	GSM/ Berga Sud
BSS002GPFS	Pignan_retraite	760362	6276230	1	BRGM/AFB
BSS002GPFR	Boulidou	759834	6275755	1	SBL
BSS002GPFN	Olivet	762375	6278100	1	SBL
BSS002JEKE	P4_Balme	756846	6262232	2	BRGM/AFB
BSS002JCZU	Frescaly	756045	6263857	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018
BSS002JCZV	Vignes	755910	6263913	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018
BSS002JCMA	F5 Autoroute	755375	6263992	2	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2019
BSS002JEHM	CGE_Tennis	755777	6262898	2	BRGM/AFB
BSS004AWUN	Cambelliès	751107	6262201	2	SMBT
BSS002JCZS	F5_Moulières	756442	6264094	2	SMBT
BSS003CINI	Cèdre	757192	6264258	2	SMBT
BSS002JEKD	Sce_Amb	756539	6260705	3	BRGM puis SMBT
BSS002JDNJ	Sce_Cauvy	755378	6260974	3	CD34
BSS002JDNJ	Sce_Cauvy	755453	6260924	3	SMBT
-	Lagune THAU	754483	6260247	3	Thermes
BSS002JDXG	F14	754506	6260253	3	Thermes
BSS002JDUZ	F3	754658	6260536	3	Thermes
BSS002JDVA	F4 Hôtel	754868	6260789	3	BRGM/AFB
BSS002JDVB	F5	754589	6260576	3	Thermes
BSS002JDXA	F6	754676	6260877	3	BRGM/Demeaux
BSS002JDWH	F8	754773	6259905	3	Thermes
BSS002JDXB	F9	754588	6260575	3	Thermes
BSS002JDMR	la Vise	754410	6260718	3	BRGM/Demeaux
BSS002JDNH	S12	754907	6260374	3	SMBT
BSS003CGKO	pz Stade-Michel	754219	6257281	4	BRGM/Demeaux
BSS002JCLT	La Calade (St Farriol)	749368	6266070	*	Mairie de Villeveyrac/BRL
* Entité "Bassin de Villeveyrac"					

Tableau 1 : Liste des points suivis et report de leur zone hydrogéologique (cf. Illustration 6)

2.3. CHRONIQUES DU RÉSEAU D'OBSERVATION

Les figures suivantes (Illustration 8 à Illustration 10) présentent les évolutions de la piézométrie mesurée dans les compartiments amont et aval sur la période août 2020-juillet 2021, ce qui permet d'examiner la réponse hydrogéologique suite au phénomène d'inversac de 2020 (début 28 novembre 2020). L'Illustration 12 présente l'évolution du débit de la source sous-marine de la Vise et des paramètres physico-chimiques (température, conductivité électrique).

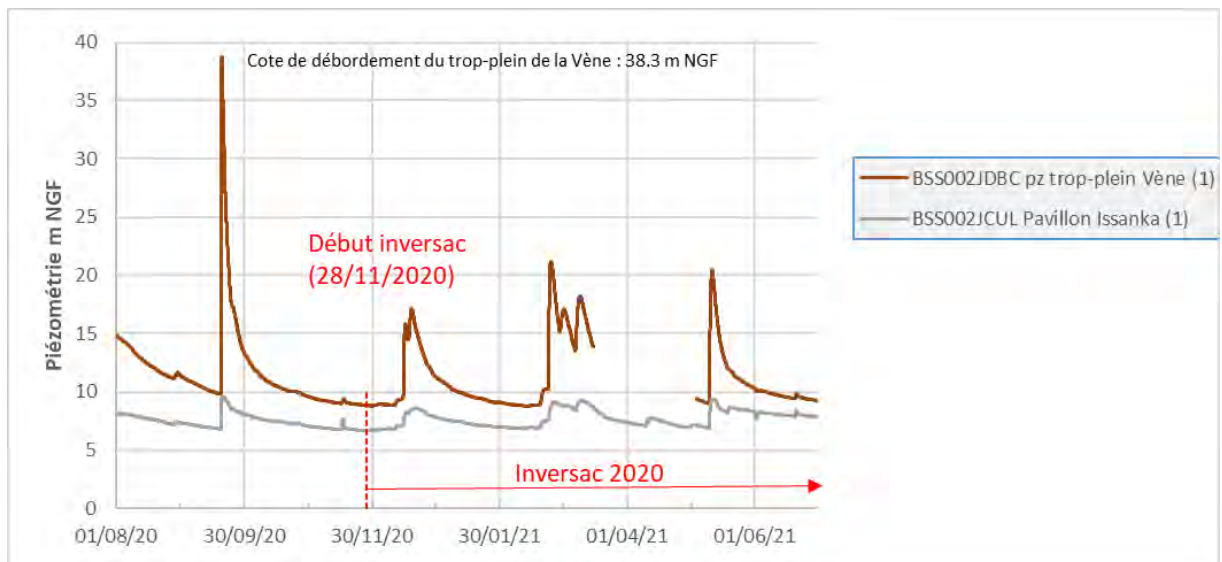


Illustration 8 : Évolution piézométrique dans le compartiment « amont » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac)

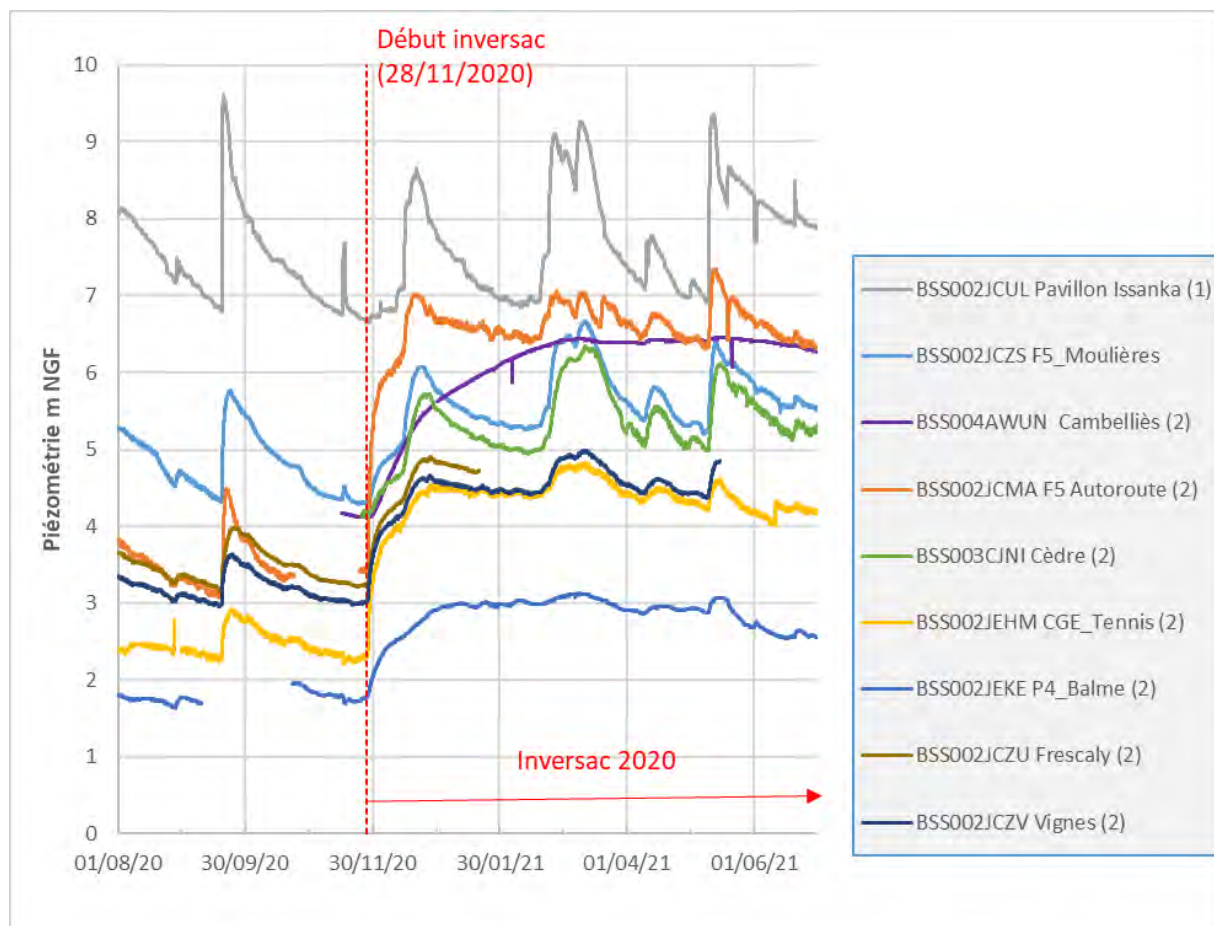


Illustration 9 : Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur la zone 2 (cf. Illustration 6)

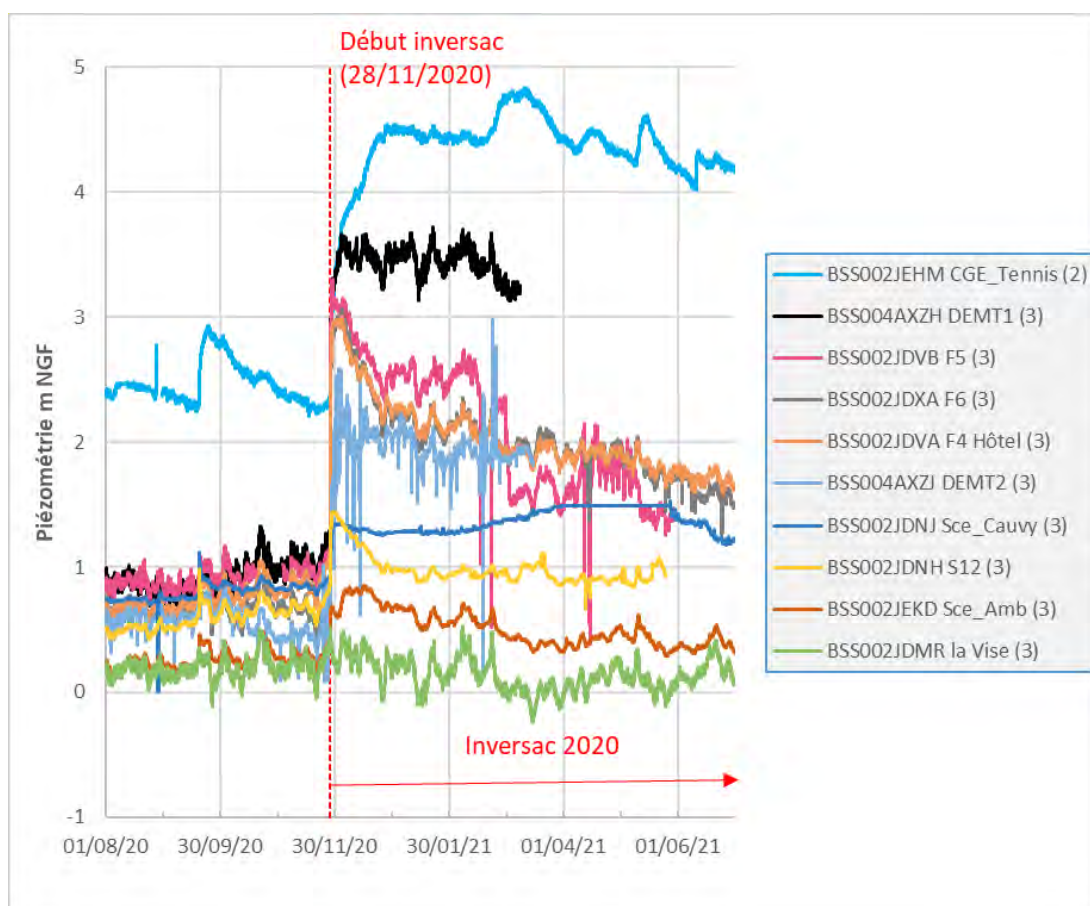


Illustration 10 : Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur la zone 3 (cf. Illustration 6)

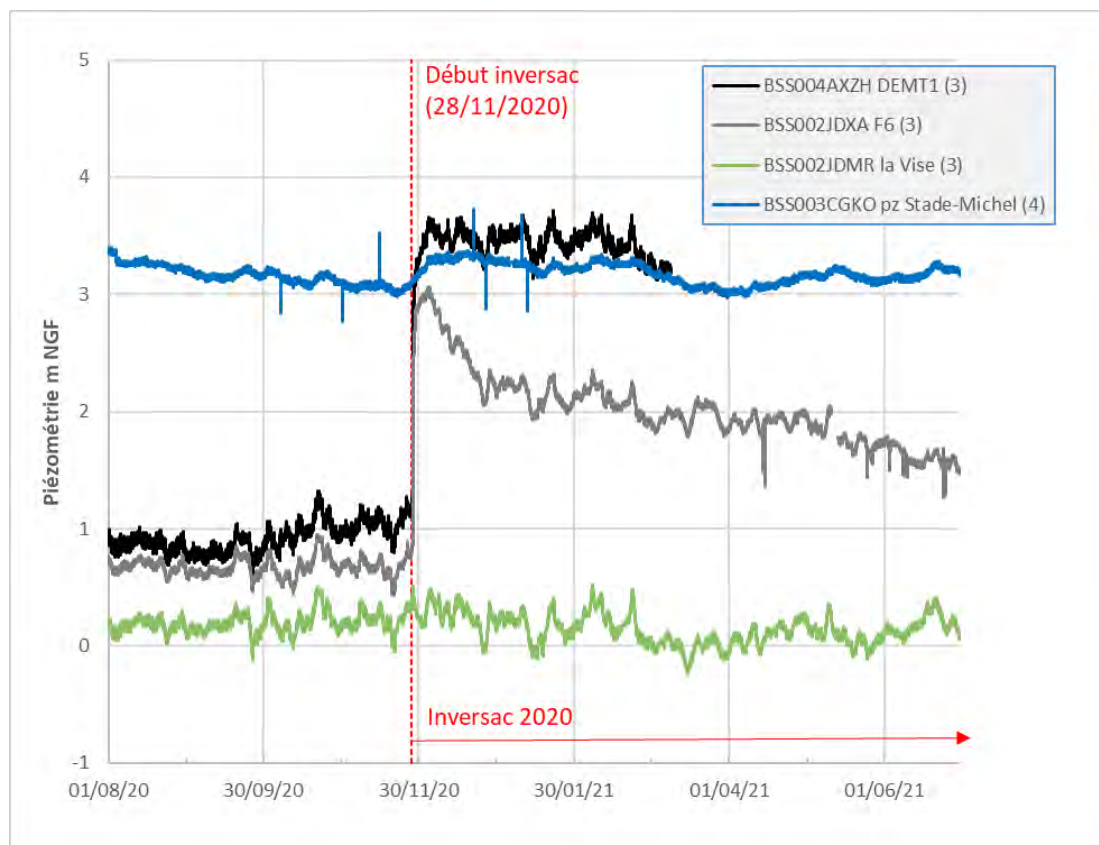


Illustration 11 : Évolution piézométrique dans le compartiment « aval » depuis le 01/08/2020 (avant et après le déclenchement de l'inversac), focus sur les zones 3 et 4 (cf. Illustration 6)

3. Mécanisme d'inversac : exemple de 2020-2022

3.1. HISTORIQUE DES INVERSACS DE LA VISE

Le phénomène d'inversac consiste en une inversion du sens d'écoulement des eaux au sein du conduit karstique mettant en relation l'aquifère du Jurassique avec l'étang de Thau au niveau de la source de la Vise. En situation normale, des écoulements d'eau douce ascendants alimentent la lagune de Thau et drainent l'aquifère Jurassique. En période d'inversac, les eaux saumâtres de la lagune s'infiltrent vers l'aquifère du Jurassique.

Un bilan des informations disponibles sur les phénomènes d'inversac a été réalisé dans la première phase de projet (Ladouche *et al.*, 2019). Ce bilan présente les six inversacs qui ont pu être détectés à la source de la Vise depuis les années 1960. Ces détections n'excluent pas que des phénomènes se soient produits avant ou entre les épisodes documentés.

La chronologie des 6 événements antérieurs à celui de 2020 est la suivante :

- 1) Inversac du 22 octobre 1967 (augmentation des niveaux d'eau sur la presqu'île en janvier 1968) avec une fin probable en mars 1969 (des doutes subsistent sur la date de fin de phénomène)
- 2) Inversac du 18 mai 1984 (augmentation de la minéralisation de la source de Cauvy) avec une fin non documentée
- 3) Inversac du 06-07 octobre 1993 (détecté par l'observation d'une intervention humaine sur la cloche placée sur la Vise et par une baisse conjointe de la minéralisation et de la température de l'eau pompée au forage F5 de Balaruc) avec une fin le 31 octobre 1993 (durée : 25 jours)
- 4) Inversac du 2 janvier 2008 avec une fin le 23 mars 2008 (durée : 81 jours)
- 5) Inversac du 10 juin 2010 avec une fin le 25 décembre 2010 (durée : 198 jours)
- 6) Inversac du 5 mai 2014 avec une fin le 22 octobre 2014 (durée : 170 jours)

L'inversac de 2020-2022 a débuté le 28 novembre 2020 à 09h45 et s'est terminé le 14 mars 2022 à 08h35 (durée = 471 jours).

3.2. DESCRIPTION DE L'INVERSAC DE 2020-2022

Un inversac s'est déclenché à la fin du mois de novembre 2020. Pour cet inversac de 2020, le suivi mis en place sur la source de la Vise au cours du projet DEM'EAUX Thau permet d'identifier les caractéristiques principales suivantes (Illustration 12) :

- début de phénomène : 28 novembre 2020 à 09h45 ;
- éléments déclencheurs : phénomène de surcote de la lagune dans un contexte hydrogéologique de très basses eaux ;
- débit de la Vise avant le phénomène : de l'ordre de 60 L/s ;
- débit d'infiltration³ (Lagune vers Vise/karst) : de l'ordre de -350 L/s au début du phénomène (28/11/2020) ;
- débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) : de l'ordre de -150 L/s quelques mois plus tard (jusqu'en mars 2021) ;
- débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) : fluctuation autour de -200 L/s jusqu'à la fin du phénomène.

³ Par convention le débit d'infiltration (Lagune vers Vise/karst) est négatif.

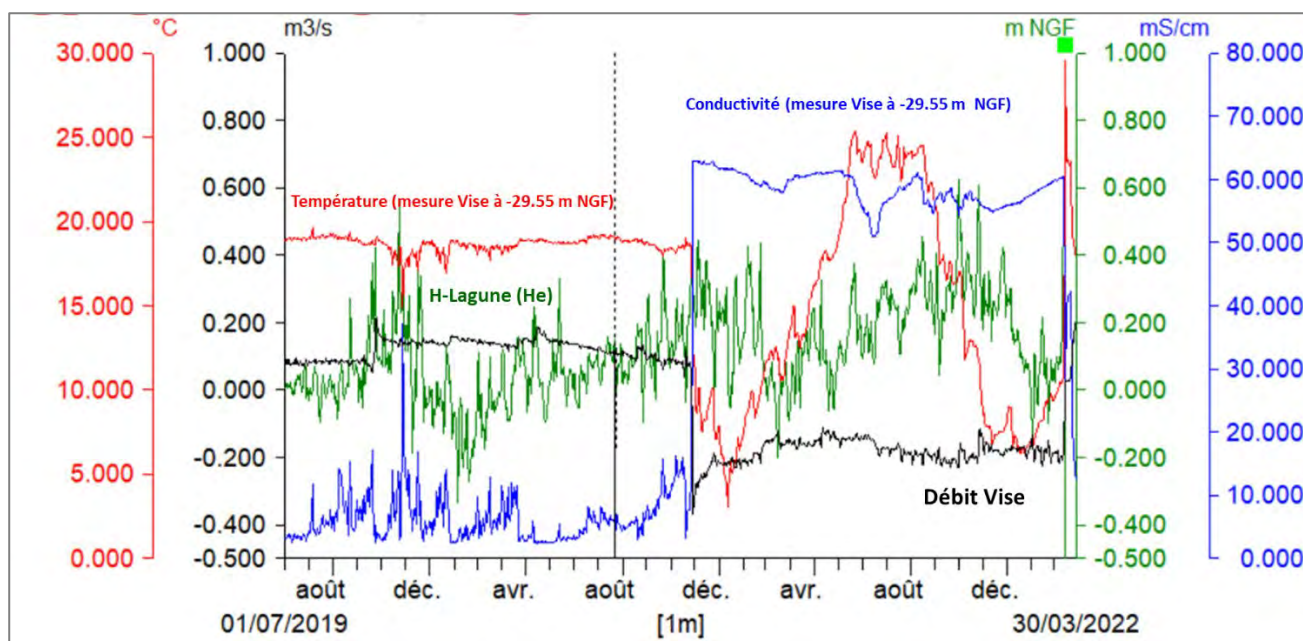


Illustration 12 : Évolution des paramètres physico-chimiques et conditions hydrologiques de l'étang et de la source de la Vise au moment de l'inversac de 2020

3.3. CONTEXTE HYDRO-CLIMATIQUE DE L'INVERSAC DE 2020-2022

3.3.1. Caractérisation de l'indice de sécheresse de l'hydrosystème à l'aide de l'Index standardisé des précipitations (SPI)

L'index standardisé des précipitations (SPI) (T B McKee *et al.*, 1995; Thomas B McKee *et al.*, 1993) est un indicateur qui peut être utilisé pour analyser des épisodes de sécheresse à différentes échelles de temps (trimestre, semestre, année...). Dans cette étude, les calculs ont été réalisés à l'aide de [SPI Generator](https://www.drought.unl.edu/Monitoring/SPI/SPIProgram.aspx) fourni par le National Drought Mitigation Center, University of Nebraska⁴.

La méthode repose (étape 1) sur la construction d'une série de précipitations mensuelles continue d'au moins 30 ans. Puis (étape 2), le calcul d'un cumul de précipitation sur n mois glissants ($n = 3, 6, 12$ mois ou plus), ces n mois représentent les échelles de temps représentant les périodes déficitaires en précipitation pouvant impacter les réservoirs du cycle de l'eau (sol, aquifère...). Dans un second temps (étape 3), pour chaque valeur de n , on constitue 12 séries mensuelles (janvier à décembre) de valeurs cumulées sur la période N années sur lesquelles est ajustée une loi gamma (une loi pour chaque mois). Enfin (étape 4), pour chaque mois de janvier à décembre, la loi gamma ajustée est projetée sur la loi normale centrée-réduite à partir des N valeurs de cumuls considérés ($n = 3, 6 \dots$ mois).

Cette opération consiste en une projection quantile-quantile. La courbe continue de SPI- n -mois obtenue sur l'ensemble de la chronique des N années de précipitations disponibles permet la caractérisation des épisodes de sécheresse. L'épisode sec commence lorsque le SPI devient négatif, différents seuils du SPI peuvent être définis pour qualifier sa sévérité en terme de période de retour (-1.28 : décennal sec, -1.64 : vingtenal sec).

⁴ <https://www.drought.unl.edu/Monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>

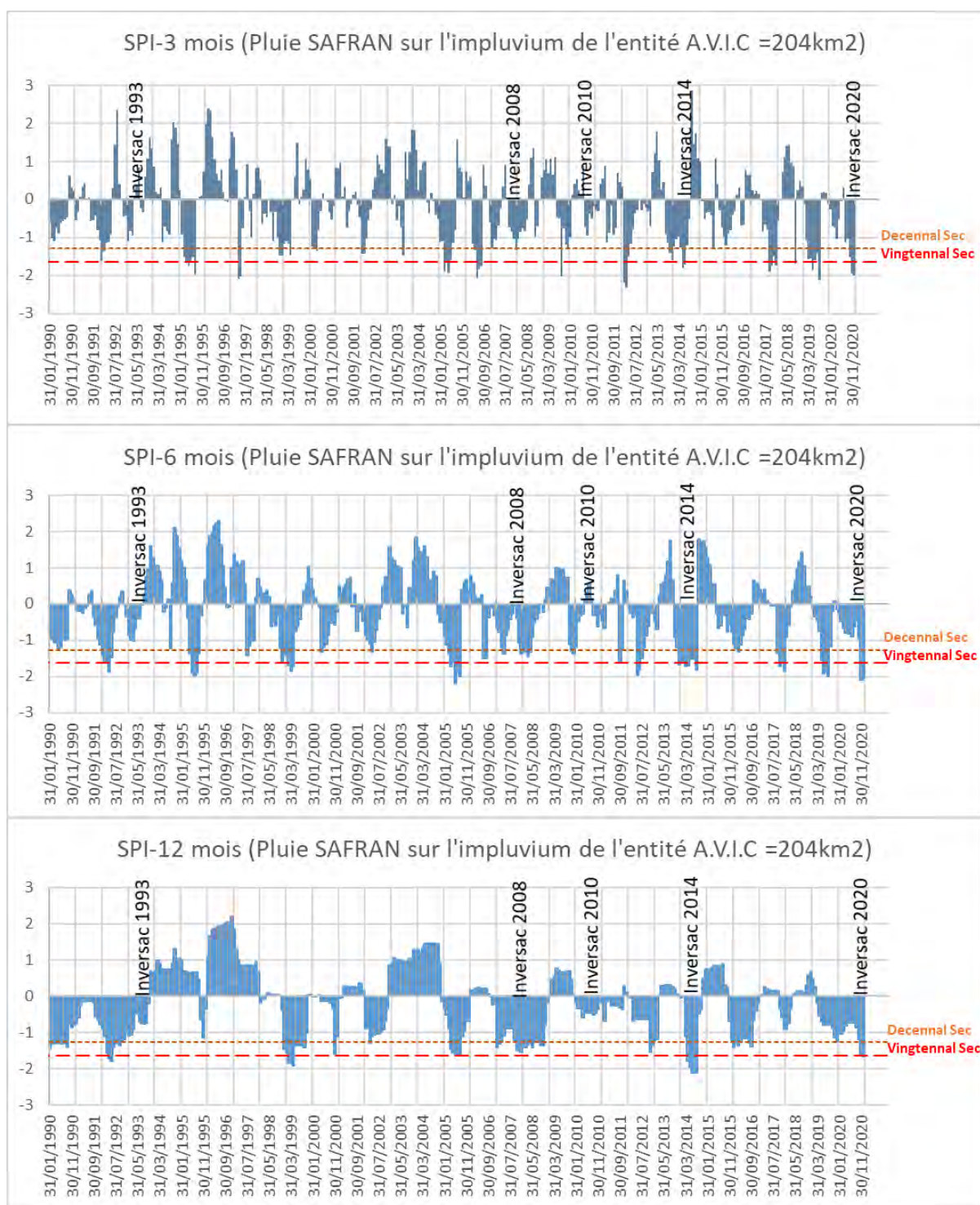


Illustration 13 : Caractérisation des périodes de sécheresse par l'index standardisé des précipitations (SPI)

Dans cette étude, les SPI ont été calculés à partir de la pluie SAFRAN sur la zone d'étude (pondération surfacique des mailles SAFRAN recoupant l'impluvium du bassin d'alimentation de l'entité A.V.I.C estimé à 204 km²) disponible depuis 1960. Les SPI 3 mois, 6 mois et 12 mois sont présentés (Illustration 13). Le Tableau 2 permet de visualiser, pour chaque période d'intégration considérée (1, 3, 6, 12, 18 et 24 mois) la valeur de l'index standardisé des précipitations (SPI) lors de déclenchement des phénomènes d'inversac. L'index SPI-12 mois apparaît assez bien adapté pour décrire l'état de sécheresse du système hydrogéologique au moment des déclenchements des inversacs. Pour l'inversac de 2020, le contexte pluviométrique des 12 mois précédents était très déficitaire (-1.75) ce qui correspond à un contexte de période de retour supérieure à 20 ans sec.

Date Début Inversac	SPI-1 mois	SPI-3 mois	SPI-6 mois	SPI-12 mois	SPI-18 mois	SPI-24 mois
06/10/1993	0.96	1.01	0.73	0.14	0.8	-0.17
02/01/2008	0.5	-0.62	-1.17	-0.84	-1.11	-1.95
10/06/2010	0.2	0.01	0.75	-0.58	-0.16	0.03
05/05/2014	-0.34	-1.46	-1.21	-1.91	-0.89	-0.87
28/11/2020	-1.2	-1.56	-2.08	-1.75	-1.4	-2.13

Tableau 2 : Estimation des SPI de la zone d'étude au moment du déclenchement des inversacs de la période récente (depuis 1993)

3.3.2. Caractérisation de l'indice de sécheresse de l'aquifère à l'aide l'indice standardisé des eaux souterraines (SGI)

Pour étudier l'occurrence des sécheresses des eaux souterraines, Bloomfield et Marchant (2013) ont développé l'indice standardisé des eaux souterraines (SGI : Standardized Groundwater Index). La méthode est inspirée de l'index standardisé des précipitations. Dans cette étude les calculs ont été réalisés à l'aide de Pastas, un module fonctionnel de Python 3.7, développé par Collenteur et al (2019). Le SGI implémenté dans Pastas (ps.stats.sgi) est basé sur la description de Bloomfield et Marchant (2013).

La méthode SGI nécessite des intervalles de temps réguliers entre les observations des niveaux des eaux souterraines, alors que les séries chronologiques historiques des niveaux des eaux souterraines sont souvent caractérisées par des intervalles de temps irréguliers entre les observations, voire par des lacunes. Pour surmonter ce problème, les lacunes piézométriques ont été comblées à partir des séries temporelles simulées par le logiciel Gardenia 8.6 (cf. rapport L11A, BRGM/RP-71757-FR). L'exemple ci-dessous présente les résultats à partir des chroniques mesurées et simulées du piézomètre CGE-Tennis (BSS002JEHM, Illustration 14).

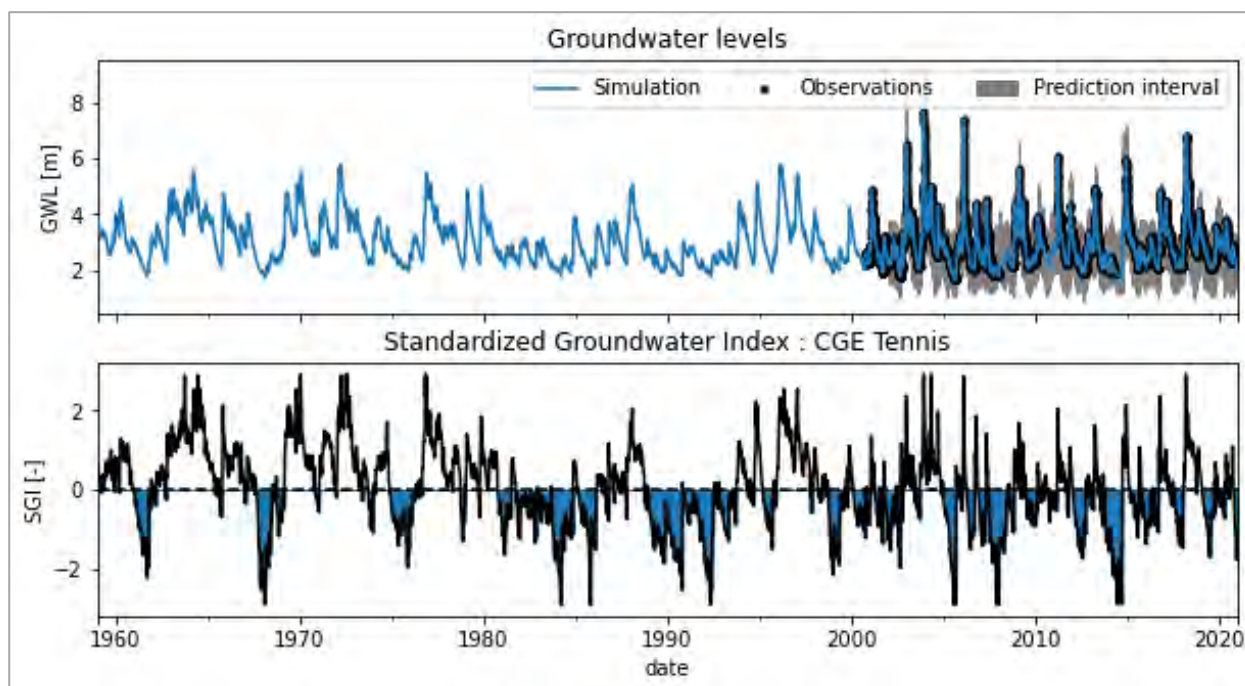


Illustration 14 : Observations et simulation de la chronique piézométrique de l'ouvrage CGE-Tennis (BSS002JEHM) à l'aide de Gardenia (cf. rapport L11A, BRGM/RP-71757-FR) et calcul du SGI (Bloomfield et Marchant, 2013) avec Pastas (Collenteur et al, 2019)

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode SGI (Illustration 15) indiquent que les inversacs de 1993, 2008, 2014 et 2020 sont survenus dans des contextes très déficitaires (vingtennal sec pour 2008, 2014) et décennal sec pour 2020. Seul l'inversac de 2010 semble faire exception, le contexte piézométrique étant proche de la normale. Nous verrons par la suite que d'autres facteurs jouent également un rôle dans la mise en place de l'inversac.

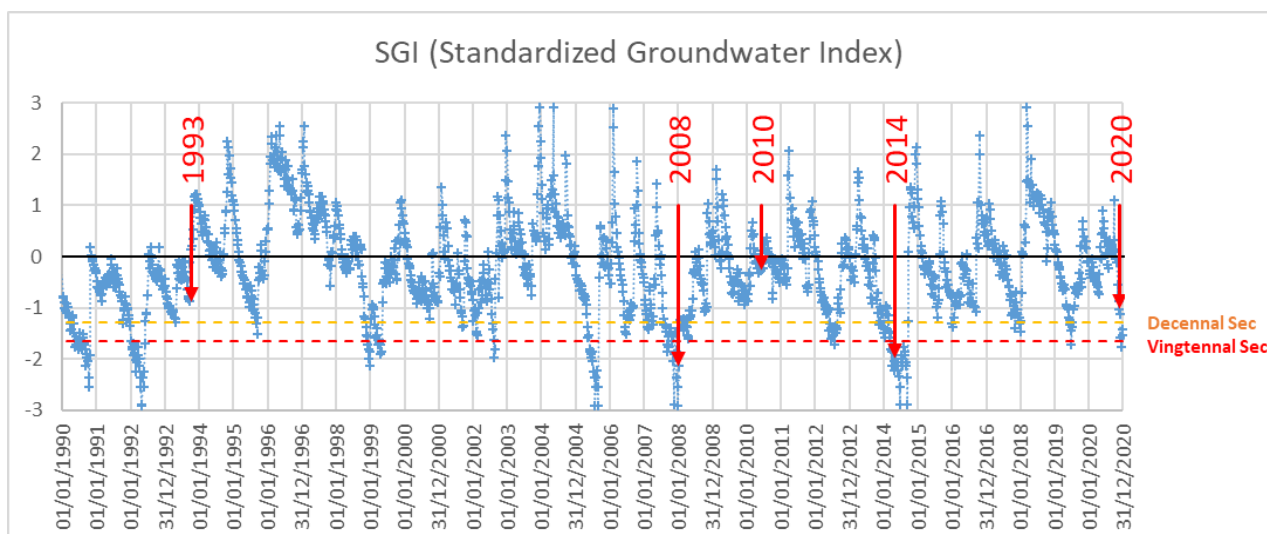


Illustration 15 : Évolution du SGI pour l'ouvrage CGE-Tennis et report des dates des inversacs

3.3.3. Caractérisation du niveau d'eau de la lagune de Thau

Le dispositif expérimental de suivi du débit de la Vise permet également d'enregistrer les variations de la cote du plan d'eau de la lagune de Thau. Les données (exprimées en m NGF) sont disponibles au pas de temps de 5 mn depuis le 25 juin 2019 (BRGM/RP-70842-FR). Ces données complètent les suivis réalisés par les thermes à proximité de l'ouvrage F14, données horaires, avec lacunes depuis 2012. Les données horaires du marégraphe de Sète (<https://data.shom.fr/>) ont été utilisées pour estimer et reconstituer les données manquantes depuis 2007. Le facteur de normalisation a été déterminé à partir des données de l'observatoire DEM'EAUX collectées sur la période juin 2019 - décembre 2020. La chronique synthétique obtenue pour la période 2007-2021 est présentée (Illustration 16). Elle rassemble les données mesurées (H Lagune) et les données de la variable Shom calibrées sur les données de H lagune mesurées à la Vise près de F14-Thermes dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau.

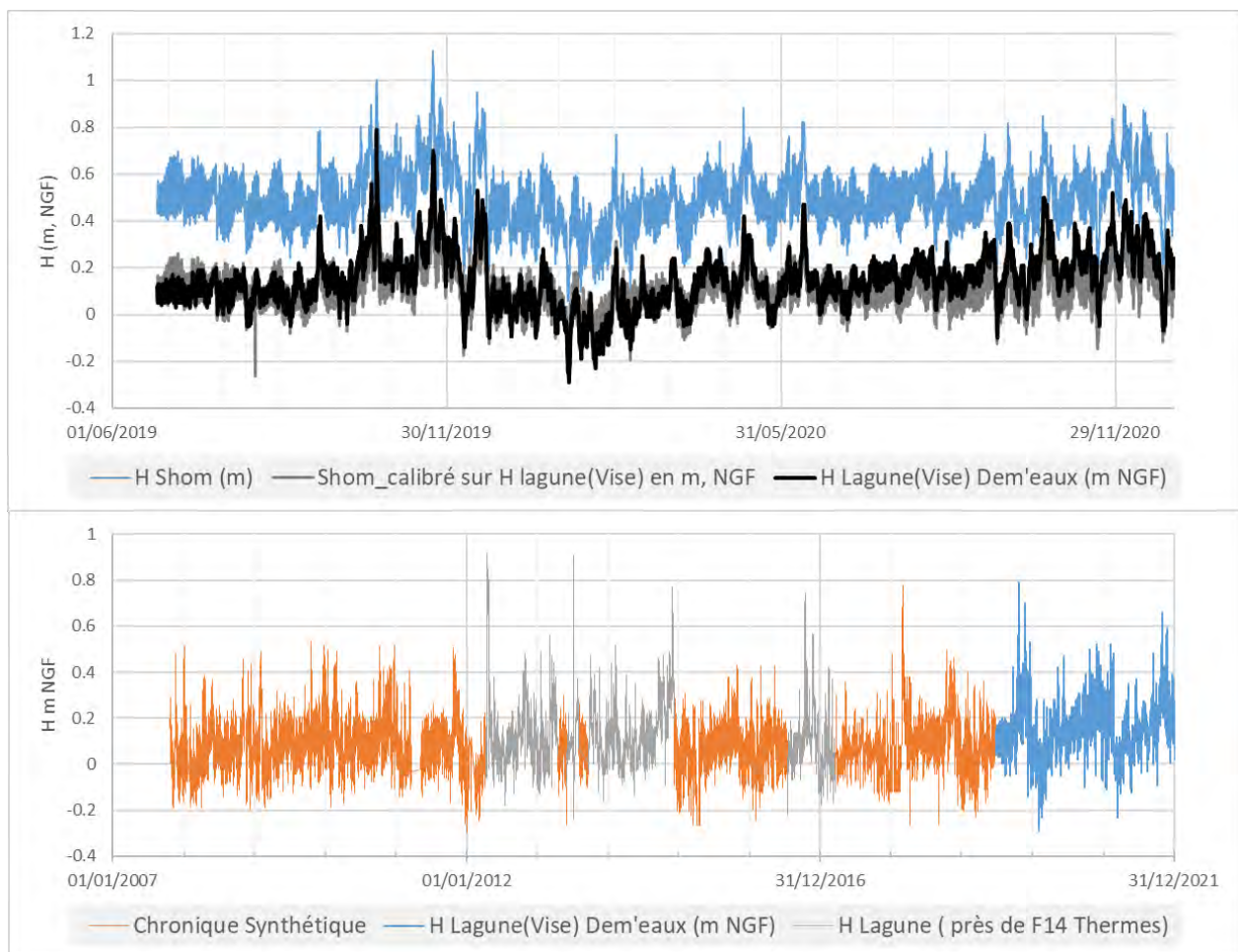


Illustration 16 : Évolution de la hauteur d'eau de la lagune de Thau à proximité de la Vise

La description statistique de la chronique synthétique (données horaires depuis octobre 2007, $n=119\,668$) est présentée (Illustration 17). Dans une représentation LogNormal, près de 50 % des données sont comprises entre 0,01 m NGF et 0,17 m NGF, moins de 10% des données sont supérieures à la cote de 0,25 m NGF. Compte tenu de ce contexte statistique, les inversacs de 2020 et 2010 sont survenus dans un contexte de haut niveau d'eau de la lagune de Thau (respectivement de 0,49 m et 0,29 m NGF), contrairement à 2014 et 2008 (Hmoyen respectivement de 0,06 m et 0,09 NGF). La valeur de HMax le jour du déclenchement d'un inversac permet d'évaluer l'importance du phénomène de surcote temporaire.

Les valeurs (H max) de 2020 et 2014 sont assez exceptionnelles, ces valeurs sont observées respectivement moins de 0.4 % et 4 % du temps sur la période 2007-2021.

Les fins des inversacs (2008, 2010 et 2014) sont survenues dans un contexte de bas niveau d'eau de la lagune de Thau (H moyen compris entre -0.01 et 0.04 m NGF), les valeurs (H min) observées ces jours-là sont comprises entre -0.11 et -0.06 m NGF, ces valeurs sont observées moins de 4 % du temps sur la période 2007-2021.

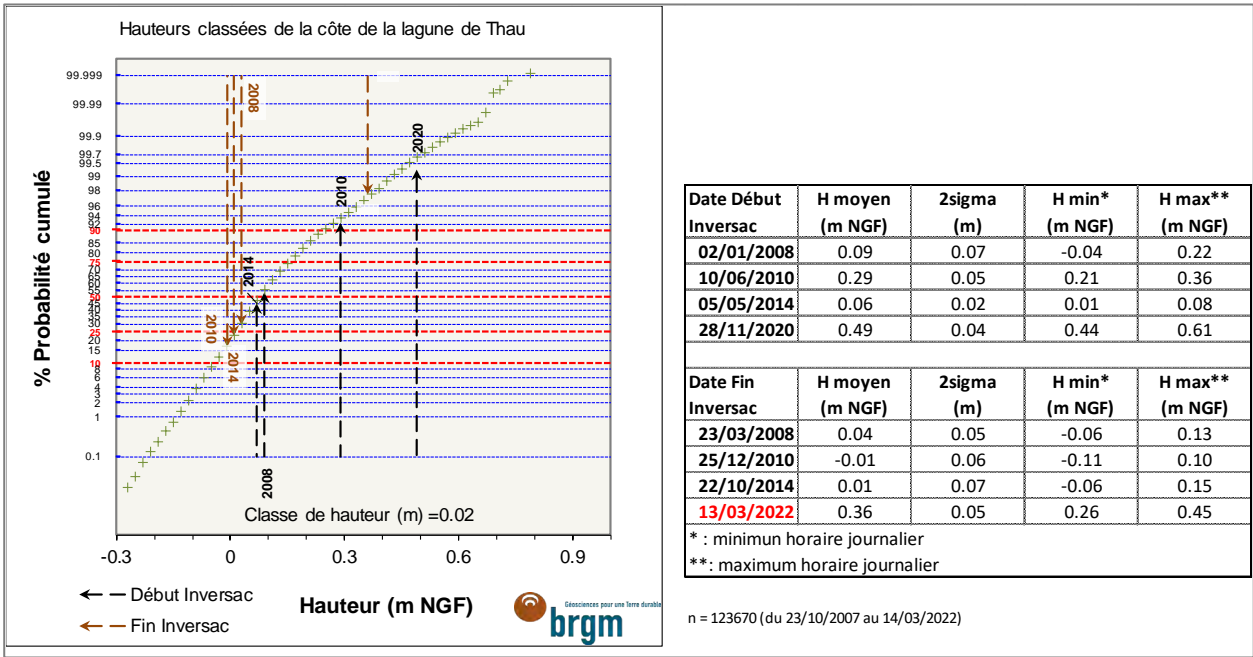


Illustration 17 : Fonction de répartition (LogNormal) des hauteurs d'eau de la lagune (2007-2021) et éléments de statistiques descriptives des phénomènes d'inversac

3.3.4. Synthèse

L'inversac de 2020 est survenu dans un contexte hydrogéologique de très basses eaux (occurrence décennal sec) et dans un contexte de haut niveau de la lagune de Thau sur lequel un phénomène de surcote temporaire est survenue. La figure suivante présente les évolutions des niveaux d'eau au sein de la presqu'île de Balaruc et les niveaux journaliers de la lagune de Thau depuis 2017 ainsi que les débits de la Vise (depuis juin 2019). Le débit de la Vise juste avant l'inversac (28 novembre 2020) est de l'ordre de 60 L/s (moyenne journalière).

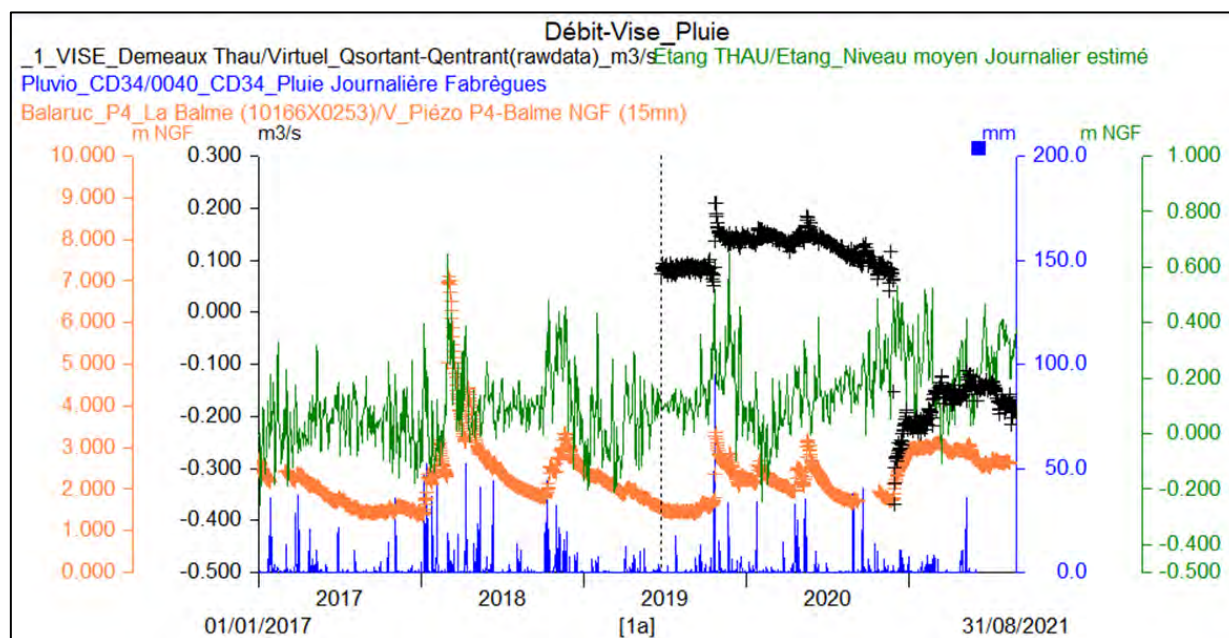


Illustration 18 : Évolution du niveau piézométrique au sein de l'aquifère jurassique au forage F4-La Balme (orange), du niveau de l'étang de Thau (vert), de la pluviométrie (bleu) et du débit de la Vise (noir).

3.4. EXPLICATION DU PHÉNOMÈNE

La source de la Vise correspond à un exutoire karstique situé à une profondeur proche de 30 mètres sous le niveau de l'étang de Thau. Il constitue l'extrémité supérieure d'un conduit karstique qui est supposé subvertical (dont la géométrie précise est inconnue) qui draine l'aquifère carbonaté karstique du Jurassique situé sous la couverture du Miocène qui le rend captif.

La configuration géométrique du contexte d'émergence est décrite à l'illustration 19a sous la forme d'une coupe verticale 2D simplifiée. Sous le griffon de la source dont l'altitude est considérée comme le niveau de référence ($z = 0$), le toit du Jurassique est situé à une profondeur P . Il convient de noter que la géométrie du conduit reliant l'étang à l'aquifère est probablement bien plus complexe que sa schématisation sous forme d'un conduit rectiligne vertical tel que représenté à l'illustration 19.

Dans l'étang, la masse volumique de l'eau est proche de celle de l'eau de mer ($\rho_e = 1031.7^5 \text{ kg/m}^3$). Dans l'aquifère, la masse volumique de l'eau souterraine varie d'un point à un autre et au cours du temps selon les mélanges entre eau douce, eau salée et eau thermique. Elle est largement inférieure toutefois à la masse volumique de l'eau de l'étang.

Le niveau d'eau dans la lagune H_e varie au cours du temps au gré du niveau de la mer Méditerranée, des marées et des épisodes de tempêtes. Le niveau piézométrique dans l'aquifère H_p varie au cours du temps en fonction de la recharge naturelle de la nappe à l'amont, des prélèvements d'eau pour les différents usages et de la vidange de l'aquifère par ses différents exutoires naturels.

⁵ Valeur estimée à partir des mesures de conductivité électrique effectuées à la source de la Vise

Dans un premier temps, considérons une situation hydrostatique de manière à simplifier le problème. En situation normale, le niveau⁶ dans l'aquifère étant supérieur au niveau de la lagune, le gradient hydraulique entre les deux masses d'eau induit des flux verticaux ascendants au sein du conduit karstique. L'eau douce de l'aquifère captif du Jurassique se déverse dans la lagune de Thau. Cette situation se produit tant que la condition suivante est respectée :

$$H_p > \rho_e / \rho_o H_e \quad \text{Équation 1}$$

En situation d'inversac, le niveau dans l'aquifère devient inférieur au niveau de l'étang, l'inversion de gradient hydraulique induit une inversion de sens des flux verticaux au sein du conduit, qui deviennent descendants. L'eau saumâtre de la lagune de Thau s'infiltre alors dans l'aquifère du Jurassique. En quelques secondes, l'eau de l'étang remplit le conduit karstique d'eau saumâtre sur une hauteur P , provoquant une augmentation instantanée de charge hydraulique au sein de l'aquifère à la sortie du conduit de la Vise. Cette augmentation de charge devra ensuite être compensée par la charge hydraulique au sein de l'aquifère pour retrouver une situation normale avec des courants ascendants. C'est la raison pour laquelle, malgré une mise en place rapide, l'inversac peut se prolonger sur des durées importantes avant qu'une pluie significative ne contribue à augmenter de façon marquée la charge hydraulique dans l'aquifère. L'inversac perdure tant que la condition suivante est respectée :

$$\rho_e / \rho_o (H_e + P) - P - H_p > 0 \quad \text{Équation 2}$$

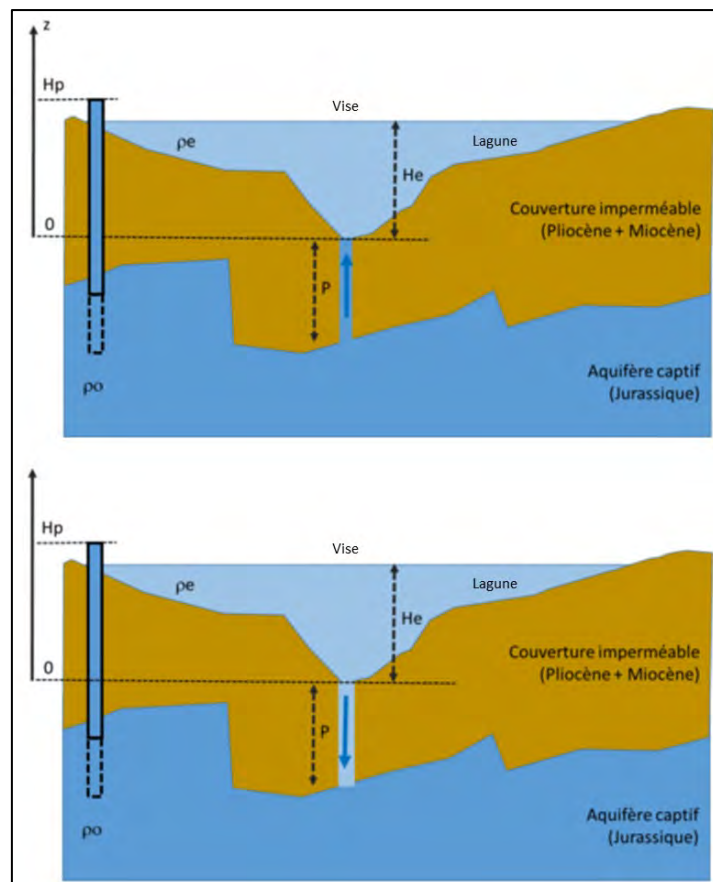


Illustration 19 : Coupe hydrogéologique 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise. Schématisation des écoulements (a) en conditions normales (b) en cours d'inversac

⁶ Niveau intégrant la densité de l'eau

3.5. RÉPONSES PIÉZOMÉTRIQUES SUITE À L'INVERSAC 2020-2022

3.5.1. Description des chroniques de mesures

Les chroniques piézométriques du réseau d'observation sont présentées (Illustration 9 à Illustration 11). L'analyse de la piézométrie des différents forages permet de mettre en évidence quelques observations majeures, comme par exemple lors de l'inversac de 2020 (Illustration 20) :

- une hausse brutale du niveau de la nappe aquifère est observée dans la plupart des piézomètres ;
- les piézomètres situés à grande distance (CGE Tennis, Vigne...) réagissent également, mais de façon plus lente et progressive ;
- la hausse maximale de piézométrie observée est de l'ordre de +2.25 m ;
- certains piézomètres sont l'objet de hausses de niveau moins élevées (S12 par exemple avec une valeur de l'ordre de +0.50 m) : il s'agit des piézomètres rencontrant l'aquifère à plus faible profondeur.

Des observations similaires ont été réalisées lors des inversacs précédents (Ladouche et Lamotte, 2015, [BRGM/RP-64812-FR](#)) ; seules les amplitudes de fluctuations sont (très) légèrement différentes d'un inversac à l'autre. L'inter comparaison des réponses observées lors des différents inversacs, au début du phénomène, est présentée pour le forage F5 (Illustration 21). Les augmentations de niveaux sont synchrones, avec des pics similaires. Seules les vitesses de décroissance des niveaux diffèrent d'un inversac à l'autre.

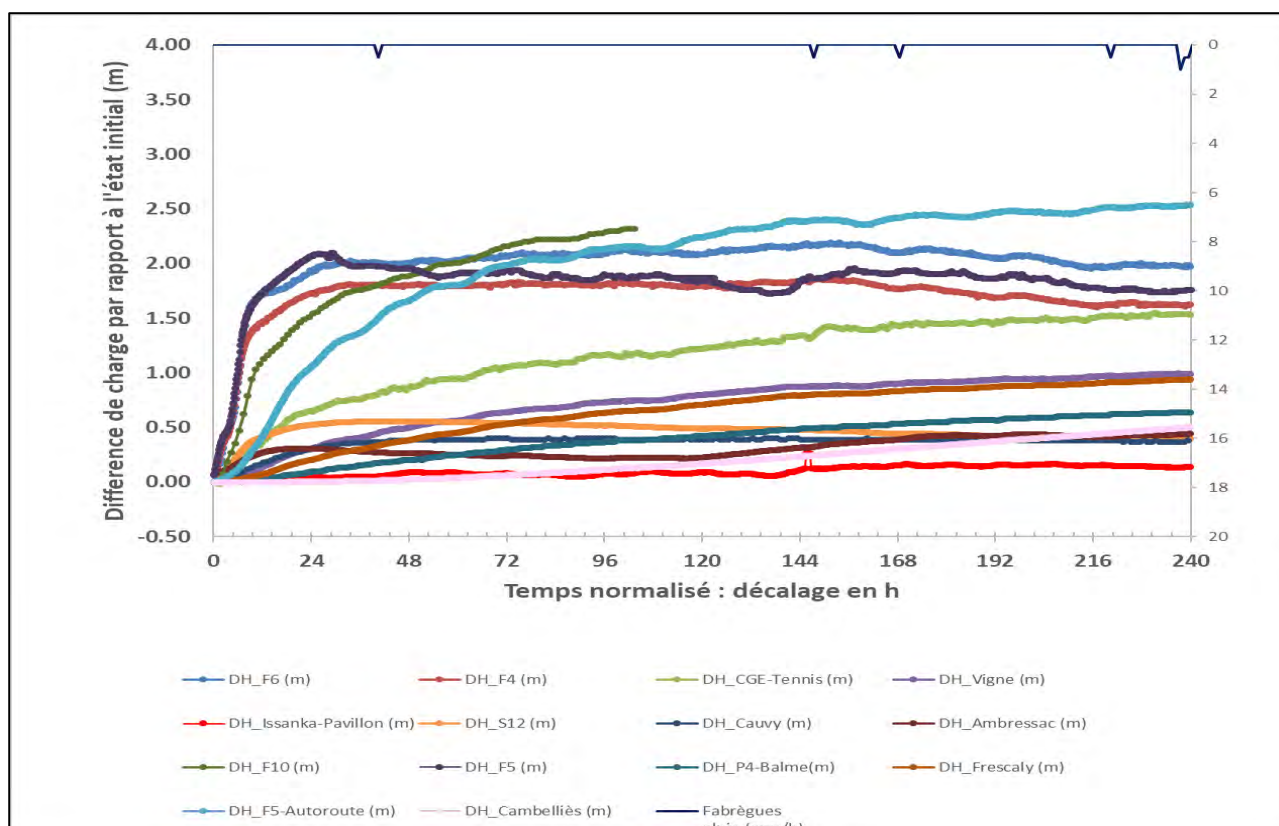


Illustration 20 : Évolution des niveaux d'eau observés après l'inversac de 2020
($t=0$ le 28 novembre 2020 à 9h40)

Nota de l'illustration 20 : Dans le but d'établir des comparaisons et de confronter les évolutions observées, les variations piézométriques sont exprimées de manière relative par rapport à la situation qui prévalait juste avant l'inversac [$DH(t) = H(t) - H_0$]. Pour l'axe temporel, nous avons adopté le temps écoulé en nombre d'heures depuis le début de l'inversac (t_0).

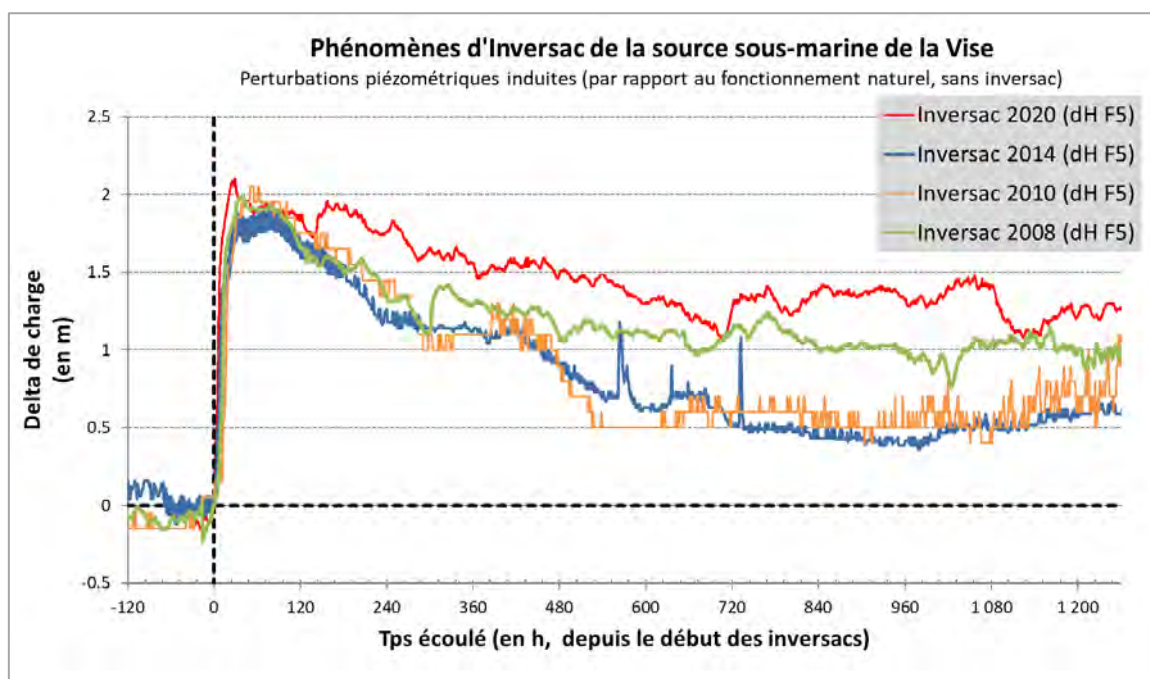


Illustration 21 : Comparaison des réponses piézométriques observées lors des inversacs de 2008, 2010, 2014 et 2020 : Exemple du forage F5 (Thermes)

3.5.2. Interprétation

L'interprétation proposée pour ces fluctuations piézométriques est la suivante. Lors d'un inversac, suite au remplissage subit du conduit karstique par de l'eau salée, la charge hydraulique au droit de l'extrémité inférieure du conduit karstique (à la Vise) augmente subitement d'une valeur égale à :

$$\Delta H_{VISE} = (\rho_e / \rho_0 - 1)P \quad (\text{Équation 3})$$

Ensuite, cette perturbation de charge se propage rapidement de façon radiale au sein de l'aquifère captif vers l'ensemble des piézomètres d'observation. Cette propagation est d'autant plus rapide que l'aquifère est fortement diffusif. Ainsi, dans les secteurs moins diffusifs, la propagation de l'onde piézométrique est moins rapide, comme le montre la modélisation analytique ci-dessous (§ 4.1.2). La fluctuation piézométrique est d'autant plus décalée dans le temps que le piézomètre d'observation est lointain par rapport au conduit karstique (ou source de la Vise) : ce point est également illustré par la modélisation analytique ci-dessous (§ 4.1.2).

La variation piézométrique maximale est celle imposée à la source de la Vise (équation ci-dessus). En chacun des piézomètres, la variation est proportionnelle à la hauteur de la colonne d'eau qui équilibre la charge hydraulique au sein du piézomètre concerné et peut être décrite par l'équation suivante :

$$\Delta H_i = \text{MIN}\{\Delta H_{VISE}; (H_{pi} + H_i)(\rho_e / \rho_0 - 1)\} \quad (\text{Équation 4})$$

Où $H_{pi} + H_i$ désigne la hauteur d'eau au-dessus du toit de l'aquifère (ou des venues d'eau dans ce milieu fracturé et karstique) au piézomètre i . Dans l'analyse qui suit, lorsque la profondeur des venues d'eau n'est pas connue, les piézomètres étant crépinés sur une hauteur significative, nous considérerons la profondeur moyenne de la zone crépinée.

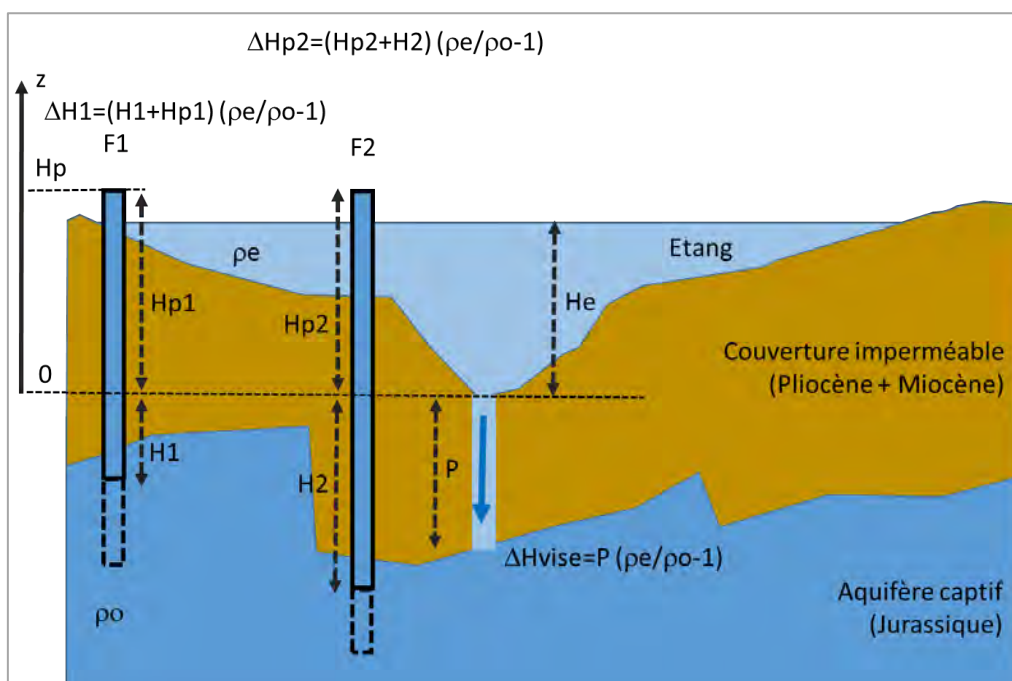
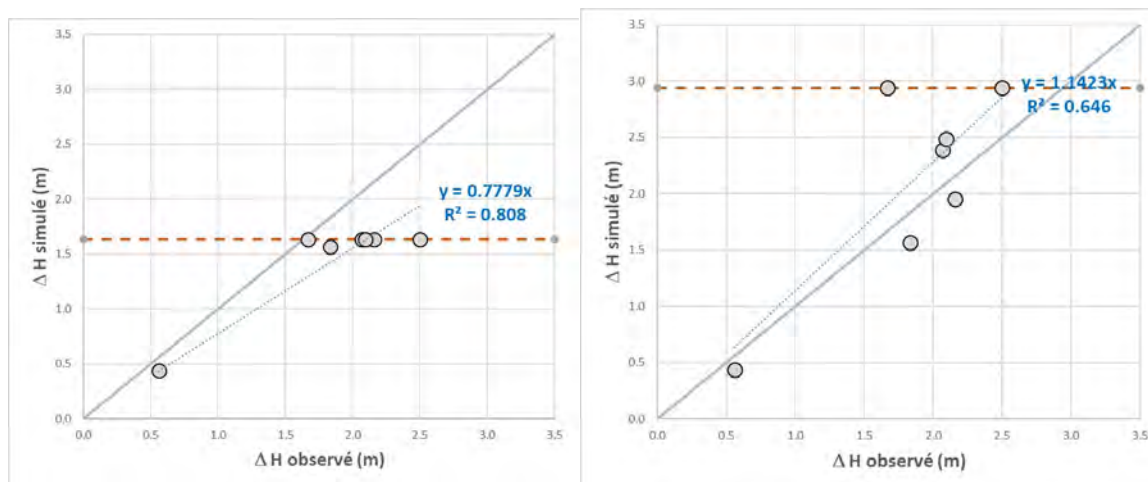


Illustration 22 : Coupe 2D verticale centrée sur l'émergence de la source de la Vise en condition d'inversac avec la localisation de deux piézomètres F1 et F2 implantés à deux profondeurs différentes

L'équation 4 a été appliquée sur les mesures piézométriques de l'inversac de 2020 en testant différentes valeurs de la profondeur P du conduit karstique, cette dernière étant inconnue mais estimée supérieure à 40 m. On constate que pour des valeurs faibles du paramètre P ($P = 50$ m par exemple, Illustration 23 à gauche), les valeurs de rebonds sont sous-estimées. Pour des valeurs élevées du paramètre P ($P = 90$ m par exemple, Illustration 23 à droite), les valeurs de rebonds sont surestimées. La valeur de la profondeur P qui permet le meilleur calage entre rebonds observés et simulés est $P = 70 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$, soit le toit du Jurassique situé à $99 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$ de profondeur au droit de la Vise. Une certaine incertitude persiste tout de même sur cette évaluation qui reste cependant en accord avec les données géologiques disponibles sur le secteur (toit du Jurassique situé à 60-70 m de profondeur au forage DemT1 (cf. BRGM/RP-70842-FR) avec un pendage en direction de la Vise).



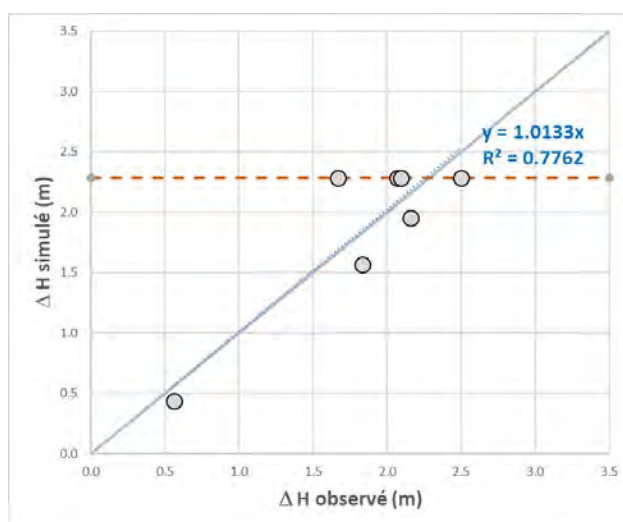


Illustration 23 : Relations entre les rebonds piézométriques observés et simulés (Eq 2) pour trois hypothèses de profondeur P du conduit karstique (en haut à gauche : profondeur $P = 50$ m ; en bas au centre : profondeur $P = 70$ m ; en haut à droite : profondeur $P = 90$ m)

Les résultats des calculs en appliquant l'équation 4 aux observations de l'inversac de 2020-2022 sont donnés au tableau suivant (Illustration 24).

Piézomètre	T (°C)	C (mS/cm)	Hp (mNGF)	ρ_0 (kg/m ³)	Hp+H* (m)	DH observé (m)	DH simulé (m)
F4	23.79	2.84	1.07	998.1	47	1.83	1.56
F5 (Th)	50.53	18.80	1.11	998.6	72	2.07	2.29
F9 (Th)	50.29	18.52	0.00	998.5	104	2.50	2.29
F6	24.54	3.90	0.81	998.4	59	2.16	1.95
F14 (Th)	46.65	17.91	0.00	999.2	190	1.67	2.29
DemT1	19.50	1.97	1.25	998.6	75	2.09	2.29
S12	45.34	19.47	0.93	1000.4	14	0.56	0.44
Vise	19.03	2.91		999.1	P = 70**		2.29
<i>Etang</i>	12.20	62.98		1031.7			0.00

Illustration 24 : Tableau de synthèse des caractéristiques des piézomètres influencés par le rebond piézométrique induit par l'inversac de 2020. * voir sa définition en Illustration 22. ** variable d'ajustement pour caler la relation de l'équation 2

3.6. RÉPONSES PHYSICO-CHIMIQUES SUITE À L'INVERSAC 2020-2022

3.6.1. Observations

Les chroniques des variables physico-chimiques, de température et de conductivité électrique, mesurées à la source sous-marine de la Vise ont été présentées sur l'illustration 12. Des exemples de chroniques de température et de conductivité électrique du réseau d'observation sont présentées ci-dessous (Illustration 25 et Illustration 26).

Ces chroniques constituent une avancée majeure atteinte dans le cadre du projet car elles permettent une caractérisation multi-échelle des modalités de transfert de chaleur et de masse au sein du réservoir des calcaires du Jurassique sous l'effet d'une perturbation ponctuelle localisée à la source de la Vise.

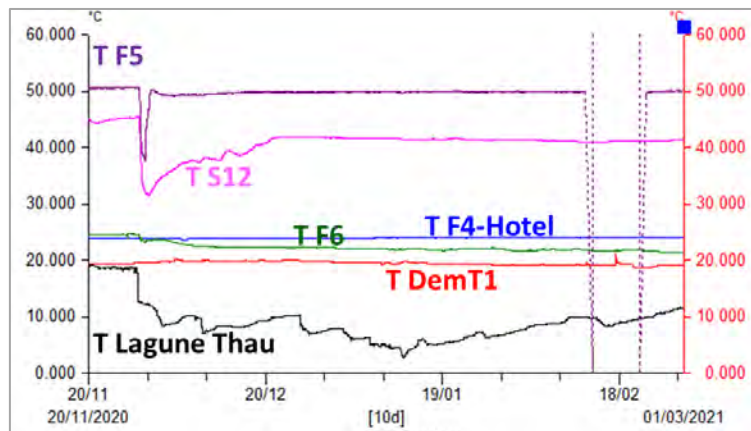


Illustration 25 : Variations de températures enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseaux de mesure proche de la source de la Vise

Dans les premières semaines de la mise en place de l'inversac 2020, les observations majeures qui peuvent être faites pour la température et la conductivité électrique sont les suivantes (Illustration 25 et Illustration 26) :

Une baisse généralisée de la température à la source de la Vise et dans la source S12 et les ouvrages Therme F5 et F6 Espéride (Illustration 25).

Concernant la conductivité électrique (Illustration 26), on peut observer :

- à la source de la Vise, le passage d'une valeur d'environ 4mS.cm^{-1} à environ 60mS.cm^{-1} de manière quasi instantanée et maintenue dans le temps ;
- aux points de mesures DemT1, F4 Hôtel, F6 Espéride et S12 (Ecole G. Sand), une réponse « généralisée » avec une hausse des conductivités électriques dans des gammes relatives de l'ordre de $+10$ à $+20\text{mS.cm}^{-1}$ et selon des délais compris entre quelques jours ($<7\text{j}$ post inversac) à S12 notamment et plusieurs semaines ($>21\text{j}$ post inversac) à DemT1 notamment ;
- au point de mesure F5 Thermes, la hausse de conductivité électrique relativement faible ou absente ;
- à la source S12, une réponse singulière de la conductivité et de la température caractérisée dans les premiers jours suivant l'inversac par une baisse conjointe de la conductivité électrique et de la température puis dans un second temps par une hausse de la conductivité électrique.

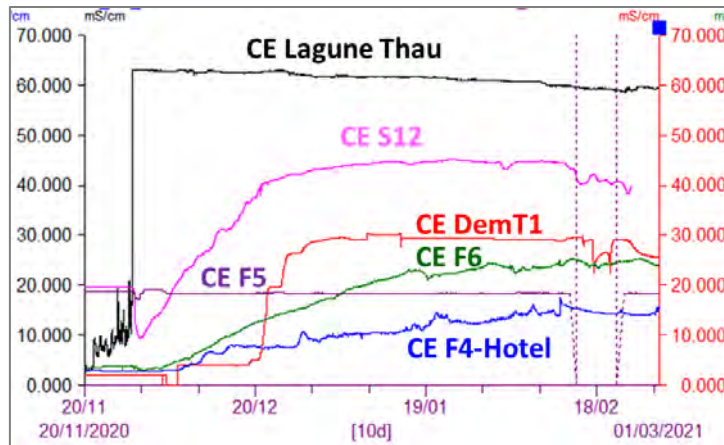


Illustration 26 : Variations des conductivités électriques de l'eau enregistrées après l'inversac de novembre 2020 dans les points du réseau de mesure proche de la source de la Vise

Dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau, les suivis combinés à la Vise et à terre (forages et sources) permettent de caractériser avec précision certaines modalités de transport de masse dans l'hydrosystème, autour de la Vise. En effet, c'est la première fois depuis le début des suivis à la source de la Vise, à la fin des années 1960, qu'au cours d'un inversac le signal d'entrée (fluctuations de la conductivité électrique et du débit) et sa propagation dans l'aquifère sont spécifiquement mesurés en différents points de la presqu'île et à différentes profondeurs. Ces mesures permettent une caractérisation multi-échelle des modalités de transport de masse dans l'aquifère du Jurassique.

3.6.2. Caractérisation des propriétés hydrodispersives dans le secteur de la Vise

Au cours du processus d'inversac, les conditions d'écoulements au droit de la Vise sont inversées de manière instantanée. Via la source de la Vise, l'eau salée de la lagune de Thau pénètre instantanément dans l'aquifère du Jurassique, ceci a pour conséquence une injection ponctuelle et continue d'un fluide salé au sein de l'aquifère. En terme de conditions aux limites, l'évènement d'inversac peut être considéré comme un créneau d'injection d'un fluide dont la composition en soluté (sel) est très différente de celle du fluide en place dans le milieu (eau douce principalement). Ainsi, le transport de sel induit par l'évènement d'inversac peut être interprété comme un traçage « naturel » ayant pour point d'injection la Vise et différents points d'observations appartenant au réseau d'observation du projet.

L'interprétation quantitative des courbes d'arrivée du sel aux différents points d'observations peut être réalisée à l'aide d'une solution analytique basée sur un modèle de transport simple (advection dispersion) unidimensionnel. Cette interprétation permet de caractériser les propriétés hydrodispersives de l'aquifère dans la région de la Vise par une approche parcimonieuse.

Modèle de transport unidimensionnel

Le modèle de transport utilisé par la suite est basé sur le modèle d'advection dispersion (ADE) qui est décrit par l'équation suivante (Kreft & Zuber, 1978; Ogata & Banks, 1961) :

$$\frac{\delta c}{\delta t} = -u \frac{\delta c}{\delta x} + D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}. \quad \text{Équation 5}$$

Dans le cas de l'inversac 2020 où une concentration constante est injectée à débit constant ponctuellement dans l'aquifère à la source de la Vise, on considère les conditions initiales et aux limites suivantes : concentration initiale constante (nulle) dans le milieu, un milieu semi infini et une injection avec un créneau de concentration constante :

$$\begin{aligned}c(x, 0) &= 0 ; x \geq 0, \\c(0, t) &= c_0 ; t \geq 0, \\c(\infty, t) &= 0 ; t \geq 0.\end{aligned}$$

Où c représente la concentration [ML^{-3}], x est la distance [L], D est le coefficient de dispersion [L^2T^{-1}], u est la vitesse d'écoulement [LT^{-1}] et c_0 est la concentration [ML^{-3}] à la limite amont (au point d'injection).

La solution analytique qui décrit l'évolution temporelle de la concentration à une distance x est :

$$c(x, t) = \frac{c_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-ut}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{ux}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+ut}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad \text{Équation 6}$$

Dans ce travail, les ajustements des courbes issues de la solution analytique et les valeurs de paramètres proposés ont été obtenus avec le logiciel d'interprétation d'essai de traçage TRAC (Gutierrez et al., 2012, 2013), en ligne : <https://trac.brgm.fr/>.

Applications du modèle de transport unidimensionnel

Le modèle de transport unidimensionnel (cf supra) a été appliqué pour l'interprétation de l'arrivée du sel aux cinq points suivants du réseau d'observation : sources de Cauvy et S12, forages F4 hôtel, F6 Espéride et DEM T1. Les figures suivantes (Illustration 27 et Illustration 28) présentent des courbes de restitutions et les ajustements obtenus pour deux points d'observations (F6 et DEM T1) situés à la même distance radiale du point d'injection (source de la Vise) et à des profondeurs différentes. Les résultats montrent que les ajustements sont relativement bons dans l'ensemble avec une bonne reproduction de l'aspect global des courbes et des temps d'arrivées.

La comparaison des évolutions présentées (Illustration 27 et Illustration 28) montre que pour une même distance radiale (F6 et DEM T1 sont situés à 5 m de différence au sol sur terre) les modalités de transport peuvent être différentes. L'évolution de l'arrivée du fluide chargé en sel au forage F6 est progressive alors que celle au forage DEM T1 est constituée de trois hausses des concentrations sur de courtes périodes de temps, donnant une évolution échelonnée. La très bonne adéquation avec le modèle d'advection dispersion dans le premier cas (F6) suggère un chemin de transport relativement court et dispersif. Dans le second cas (DEM T1), l'arrivée relativement plus tardive du fluide salé et les hausses de concentrations suggèrent une modalité de transport multi-chemins dispersifs, plausiblement en lien avec les différents drains recoupés à différentes profondeurs dans le forage (cf. Livrable L10, Ladouche *et al*, 2022 BRGM/RP-70842-FR).

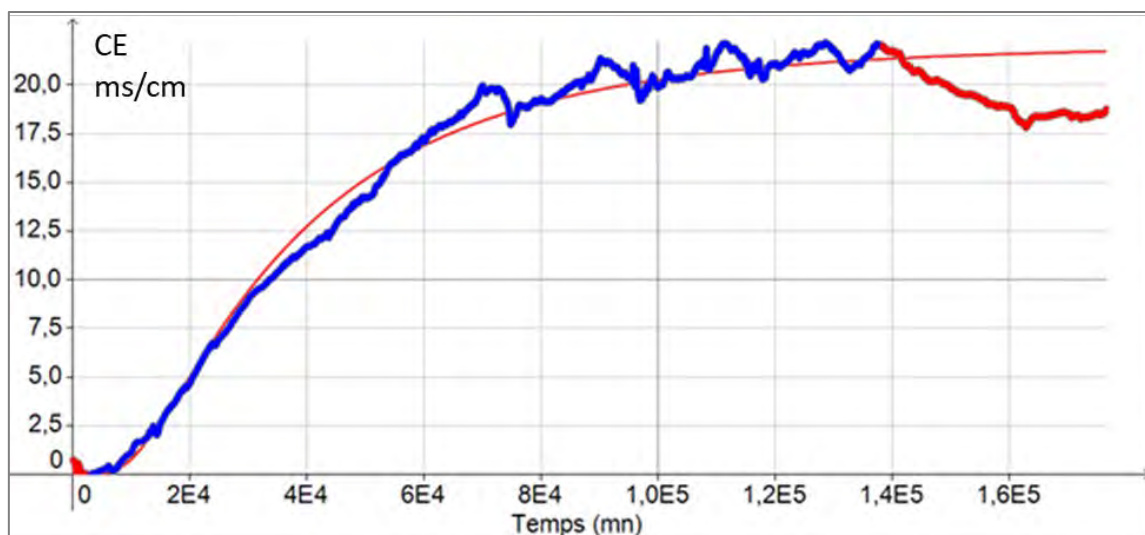


Illustration 27 : Courbes d'arrivées du sel simulée (rouge) et observée (bleu) au point d'observation du forage F6 situé dans un rayon de 300 m de la source de la Vise et à 61m de profondeur.

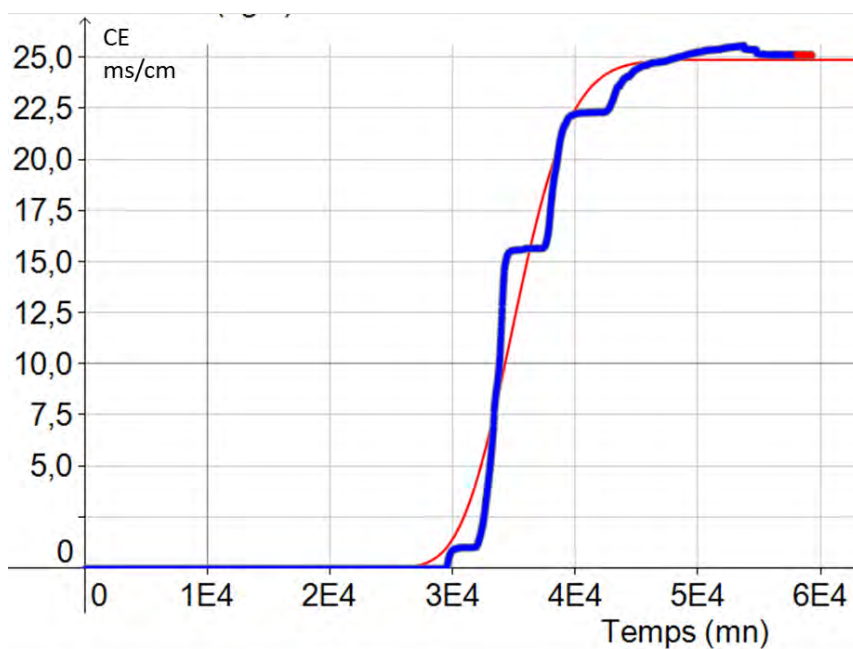


Illustration 28 : Courbes d'arrivées du sel simulée (rouge) et observée (bleu) au point d'observation du forage DEM T1 situé dans un rayon de 305 m de la source de la Vise et à 131 m⁷ de profondeur.

Le tableau ci-dessous (Illustration 29) présente les principales caractéristiques du transport dans les calcaires du Jurassique déterminées à partir de l'interprétation des chroniques d'arrivées des fronts salés dans les ouvrages du réseau de suivi.

⁷ Le capteur PTEC est situé à 131 m de profondeur au niveau de l'arrivée très productive (cf. BRGM/RP-70848-FR)

Nom ouvrage	BSS	profondeur crepine (m)	distance à la Vise	dispersion (m)	tempsArrivee (min)	vitesse moyenne (m/h)	peclet (distance / disp)
FORAGE F6	BSS002JDXA	58.5-63.5	300	100	12500	0.5	3
F4 hôtel	BSS002JDVA	38-55	455	100	12500	0.61	4.55
DEMT1	BSS004AXZH	128-168	305	1.54	29360	0.52	198.31
Source Cauvy	BSS002JDVB	0	990	200	18500	0.77	4.95
S12 Ecole Balaruc	BSS002JDNH	6?-18?	600	152.9	2400	1.8	3.92

Nota : Une conductivité de 60 mS/cm est considérée en entrée (Lagune)

Illustration 29 : Synthèse des paramètres du modèle de transport unidimensionnel utilisé pour simuler les évolutions de conductivité électrique mesurées dans les ouvrages

La méthode mise en œuvre permet de calculer les paramètres de transport du sel au sein de l'aquifère en différents points d'observation. Les paramètres de transport obtenus apparaissent homogènes pour la plupart des ouvrages, sauf DemT1 dont la dispersion est extrêmement faible en lien avec une propagation du sel dans les chemins d'écoulements préférentiels de l'aquifère (conduits karstiques). En perspective, une interprétation des résultats avec un modèle multi-chemins pourrait apporter des informations complémentaires sur les vitesses moyennes individuelles le long des différents chemins. Cette analyse montre que ces méthodes d'interprétation, habituellement appliquées aux traçages artificiels, peuvent être mises en œuvre dans le cas d'une intrusion saline.

3.7. VOLUMES D'EAU SAUMÂTRE INFILTRÉS DANS L'AQUIFÈRE PENDANT L'INVERSAC 2020-2022

L'inversac de 2020 a débuté le 28 novembre 2020 à 09h40 et s'est terminé le 14 mars 2022 à 08h35 (durée = 471 jours). Sur cette période, le volume d'eau saumâtre absorbé par le karst par l'intermédiaire de la Vise est estimé à 6.7 millions de m³ (\pm 0.3 millions de m³). La masse de sel apportée à l'aquifère est estimée à 216 000 tonnes (\pm 11 000 tonnes). Les flux moyens sont respectivement de 14 400 m³/j et 460 tonnes/j.

Sur la même période, le flux écoulé/exporté à l'exutoire Cauvy est estimé 0.6 millions de m³ (9 %), 1 700 tonnes de chlorure ont été exportées (0.9 %). Le bilan est largement non équilibré ce qui indique qu'un important stockage d'eau saumâtre s'est produit dans le réservoir. Ceci s'illustre pour le compartiment aval par une augmentation très significative de la piézométrie et également par une importante modification des paramètres physico-chimique de l'eau souterraine dans la pointe de la presqu'île de Balaruc comme en témoignent les résultats des suivis aux ouvrages DemT1, F6, F4, S12 et à la source Cauvy.

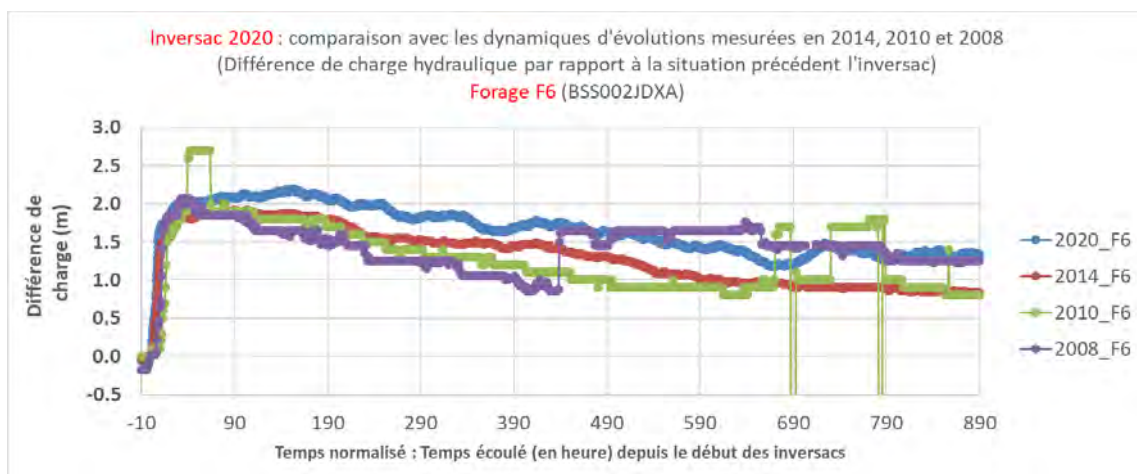


Illustration 30 : Intercomparaison des réponses hydrauliques mesurées lors des Inversac de 2008,2010,2014 et 2020 (Exemple du Forage F6 : BSS002JDXA)

Les données acquises dans le cadre du projet permettent d'estimer rétrospectivement l'ordre de grandeur des apports aux karsts qui se sont produits lors des inversacs de 2008, 2010 et 2014 en supposant une similitude des phénomènes comme le laisse suggérer l'inter-comparaison des réponses hydrauliques mesurées (Illustration 30).

	Durée (j)	Volume d'eau saumâtre absorbé par le karst (million de m ³)	Masse de chlorure absorbée (tonnes)
2020 (28/11/2020 au 14/03/2022)	471	6.7 ± 0.3 (observations)	217 000 ± 11 000 (observations)
2014 (05/05/2014 au 22/10/2014)	170	2.45 (estimations)*	78 000 (estimations)*
2010 (10/06/2010 au 25/12/2010)	199	2.9 (estimations)*	92 000 (estimations)*
2008 (02/01/2008 au 23/03/2008)	79	1.14 (estimations)*	36 000 (estimations)*

*Estimation en considérant les flux moyens de l'inversac 2020/2022 : débit d'absorption = 14 400 m³/j et flux sel : 460 tonnes/j

Illustration 31 : Volume et masse de chlorure absorbés par le karst par l'intermédiaire de la source sous-marine de la Vise : Bilans des 4 derniers phénomènes d'inversac

4. Modélisation de l'inversac

4.1. MODÉLISATION ANALYTIQUE DU REBOND PIÉZOMÉTRIQUE SUITE À L'INVERSAC DE 2020-2022

Dans cette section, nous nous attacherons à modéliser les rebonds piézométriques observés suite à l'inversac de 2020-2022.

4.1.1. Solutions analytiques

Les rebonds piézométriques observés varient en fonction de la distance du point d'observation à la source de la Vise : ce phénomène est lié à la diffusion de la perturbation de charge induite à la Vise au sein de l'aquifère jurassique. Ce phénomène peut être approché par modélisation en résolvant l'équation de diffusion au sein d'un aquifère poreux, homogène et isotrope de taille infinie.

Les changements piézométriques au sein de l'aquifère étant liés à une modification brusque de la charge hydraulique au niveau de la Vise, il convient de mettre en œuvre des solutions analytiques décrivant les effets d'une modification d'une condition limite de type Dirichlet.

Elle est exprimée ci-dessous dans deux configurations de régimes d'écoulements différentes : (i) en régime d'écoulement radial sphérique et (ii) en régime d'écoulement monodimensionnel (ou linéaire). Les deux solutions et leurs conditions limites sont décrites au tableau suivant (Illustration 32).

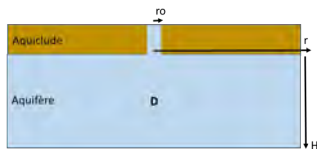

	Solution 1	Solution 2
Régime d'écoulement	Radial sphérique	Monodimensionnel
Schéma		
Équation d'écoulement	$\frac{dH}{dt} = \frac{D}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dH}{dr} \right)$	$\frac{dH}{dt} = \frac{D}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{dH}{dx} \right)$
Condition initiale	$H(r, 0) = 0$	$H(x, 0) = 0$
Condition imposée	$H(r_0, t) = \Delta H_0$	$H(0, t) = \Delta H_0$
Solution analytique	$H(r, t) = \Delta H_0 \frac{r_0}{r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r - r_0}{\sqrt{4Dt}} \right)$	$H(x, t) = \Delta H_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right)$

Illustration 32 : Tableau de description des solutions analytiques utilisées pour modéliser le rebond piézométrique observé dans l'aquifère du Jurassique après le démarrage d'un inversac

4.1.2. Résultats

Ces deux solutions analytiques ont été testées sur des piézomètres aux caractéristiques diverses, représentatives des diverses configurations rencontrées sur le secteur : (i) distance croissante à la Vise de 330 (F6) à 2600 mètres (CGE_Tennis) et (ii) profondeur de la zone crépinée de 15 (S12) à 59 m (F6).

La solution 1 (écoulement radial sphérique) sous-estime de façon majeure les variations de piézométrie induites par l'inversac ; les résultats ne sont pas présentés.

La solution 2 (écoulement monodimensionnel) permet de représenter les tendances observées (Illustration 34). Sauf pour le piézomètre éloigné (CGE-Tennis à 2600 m), on constate une surestimation des niveaux d'eau aux temps courts et ensuite une sous-estimation aux temps longs. En F4, les niveaux sont généralement sous-estimés, tout comme en F6. En S12, si la magnitude des niveaux d'eau est généralement bien représentée, la dynamique est moyennement représentée. Pour obtenir ces ajustements, le paramètre de diffusivité de l'aquifère a été calé par essais-erreurs : la valeur obtenue (25 m²/s) est commune aux 4 piézomètres, en accord avec les valeurs obtenues par interprétation des essais de pompage ou par application de la même relation au transfert de charge entre l'étang et l'aquifère (cf. BRGM/RP-70842-FR). Si les fluctuations piézométriques ne sont pas parfaitement reproduites par la solution analytique, nous considérons que les résultats sont satisfaisants et que la solution permet de représenter les tendances majeures observées, notamment en fonction de la distance à la Vise. Les écarts entre les mesures et le modèle sont en partie liés à la forte hétérogénéité de l'aquifère alors que la solution présume un aquifère homogène et isotrope. Le constat qu'un régime d'écoulement monodimensionnel satisfait mieux les observations et suggère l'importance des écoulements au sein des conduits karstiques qui favorisent une réponse hydrodynamique linéaire différente d'une réponse radiale-sphérique comme cela aurait été le cas dans un aquifère poreux classique.

Les paramètres utilisés dans la solution 2 pour simuler les rebonds piézométriques sont donnés au tableau suivant (Illustration 33). Les variations piézométriques initiales (ΔH_0) sont celles obtenues au tableau de l'Illustration 33.

Paramètre	F6	F4	S12	CGE-Tennis
Distance x (m)	330	460	700	2 600
Variation piézométrique ΔH_0 (m)	2.29	1.56	0.44	2.29
Diffusivité D (m ² /s)	25	25	25	25

Illustration 33 : Tableau des paramètres utilisés dans la solution 2 pour simuler le rebond piézométrique suite à l'inversac de 2020

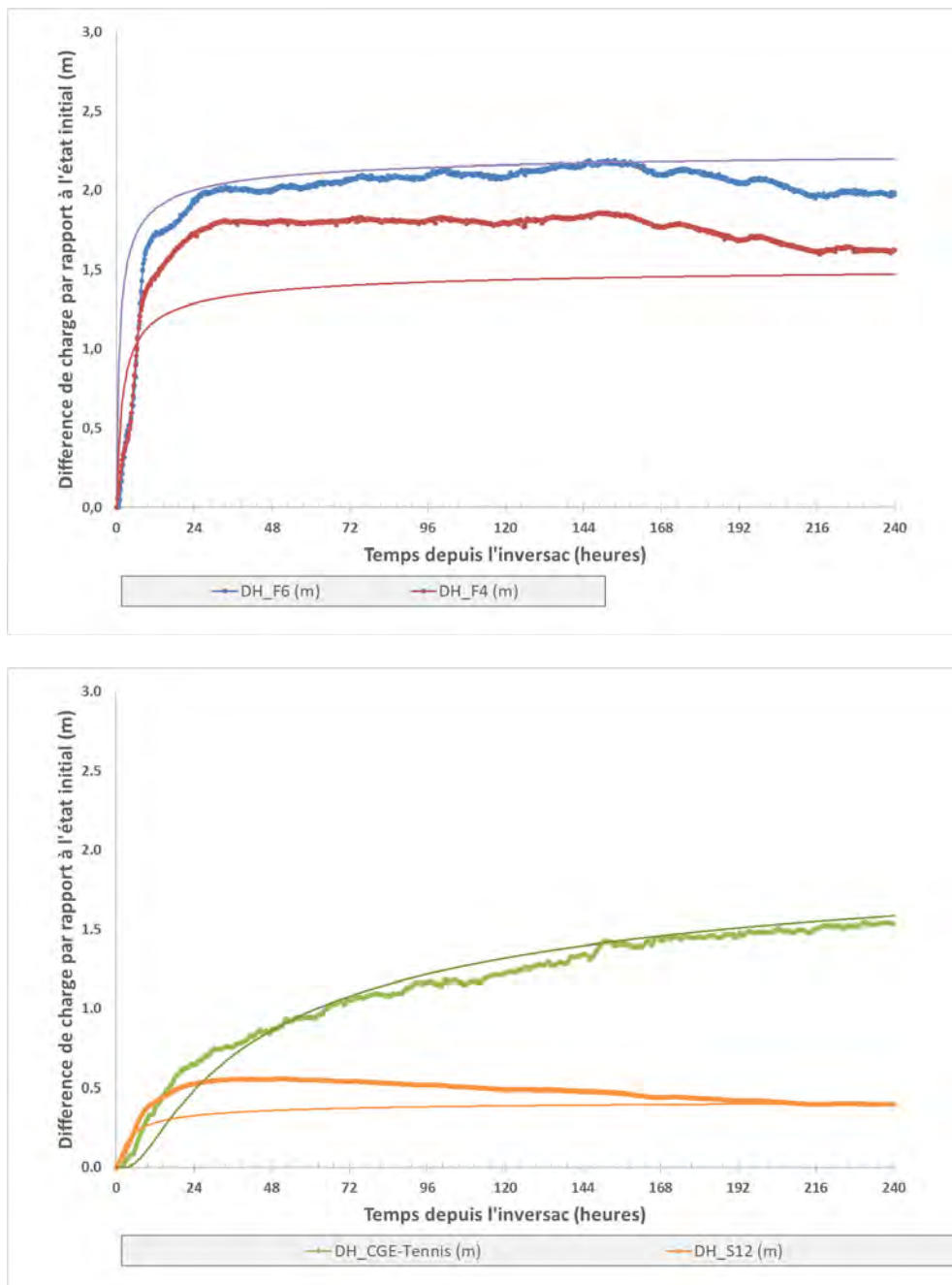


Illustration 34 : Inversac de 2020 - évolution en fonction du temps des variations piézométriques observées et simulées au moyen de la solution 2 aux forages proches F4, F6 (en haut) et éloignés S12 et CGE-Tennis (en bas)

4.2. MODÉLISATION ANALYTIQUE DES DÉBITS MESURÉS À LA VISE

4.2.1. Solutions analytiques

Dans cette section, une première tentative de prise en compte des écoulements souterrains est réalisée, en complément de l'analyse préliminaire décrite au §3.4, dont l'hypothèse était celle d'un état hydrostatique. Le système d'écoulement régional au sein de l'aquifère du Jurassique en relation avec l'étang de Thau est schématisé à l' Illustration 35.

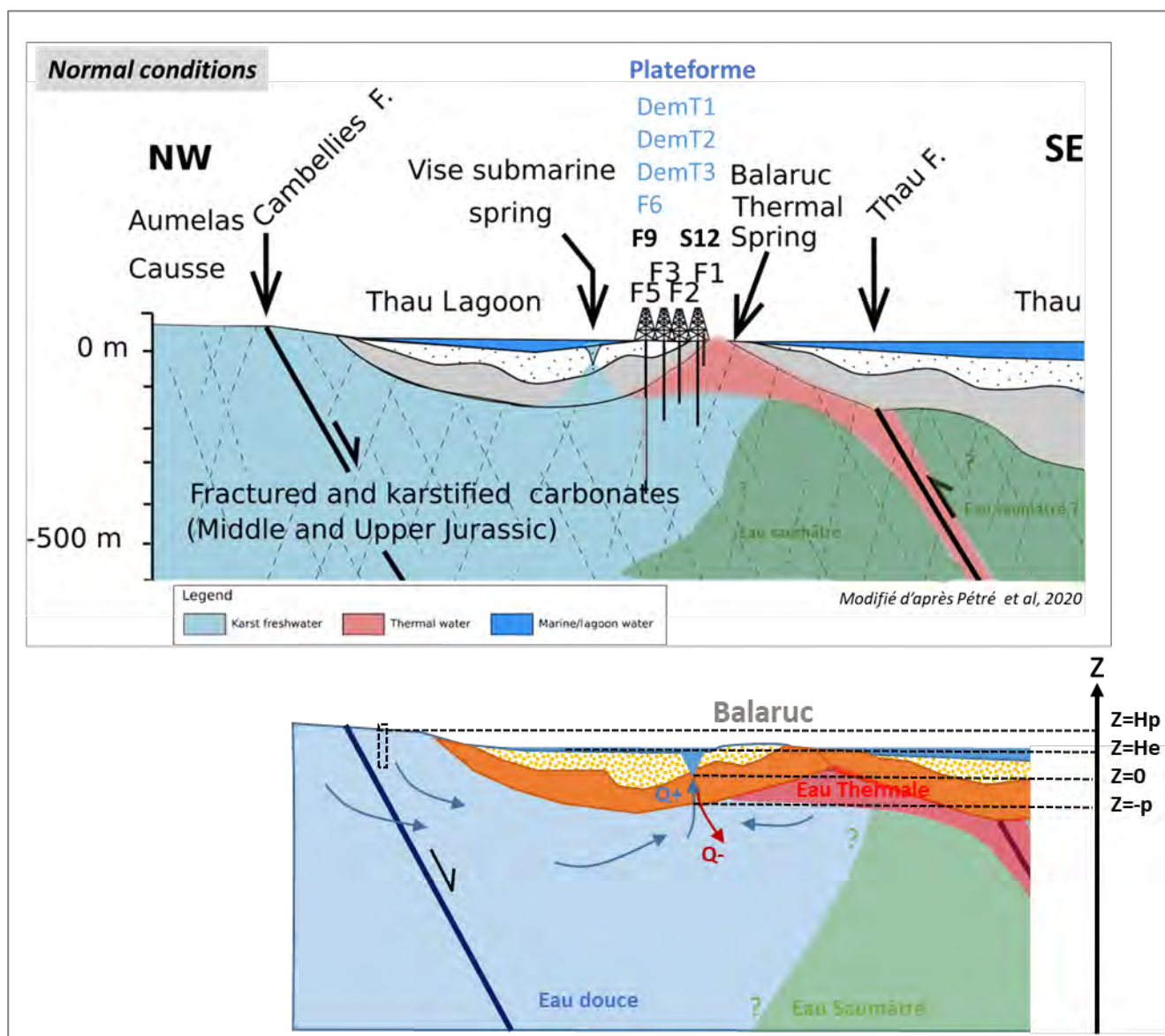


Illustration 35 : Schéma conceptuel interprétatif et coupes hydrogéologiques verticales au droit de la Vise

En situation normale (hors inversac), les débits au sein de l'aquifère karstique de Thau peuvent être décrits par les équations suivantes sous l'hypothèse d'une simplification des lois de l'hydrodynamique négligeant par exemple la géométrie du système :

- au sein de l'aquifère fissuré et karstifié du Jurassique, le débit traversant cet aquifère est proportionnel à la différence de charge hydraulique entre la zone d'infiltration à l'amont de l'aquifère et la sortie de la Vise à l'aval (hypothèse d'écoulements laminaires) :

$$Q_{Jur}^+ = A(H_P - \frac{\rho_e}{\rho_0} H_e - \Delta H_c)$$

- au sein du conduit karstique reliant l'aquifère du Jurassique à l'étang, le débit traversant ce conduit est proportionnel à la racine carrée des pertes de charge hydraulique au sein du conduit (hypothèse d'écoulements turbulents) : $Q_c = C\sqrt{\Delta H_c}$

Où ΔH_c désigne les pertes de charge hydraulique au sein du conduit karstique entre le toit de l'aquifère du Jurassique et l'exutoire de la source de la Vise ; A [m²/s] désigne le « coefficient de transmissivité » de l'aquifère du Jurassique et C [m^{2.5}/s] le « coefficient de transmissivité » du conduit karstique.

La résolution des deux équations précédentes permet d'exprimer le débit à la source de la Vise dans les deux configurations hydrogéologiques qui nous intéressent, à savoir en situation normale et en situation d'inversac.

En situation normale (lorsque $H_p > \rho_e/\rho_o H_e$), le débit sortant (> 0 par convention) de l'aquifère à la source de la Vise peut être décrit par l'équation suivante :

$$Q_{Vise}^+ = \frac{c^2}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4A^2}{c^2} (H_p - \rho_e/\rho_o H_e)} - 1 \right) \quad \text{Équation 7}$$

En situation d'inversac (lorsque $H_p < \rho_e/\rho_o (H_e + P) - P$), le débit entrant (< 0 par convention) dans l'aquifère au travers du conduit karstique de la Vise est :

$$Q_{Vise}^- = -\frac{c^2}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4A^2}{c^2} (\rho_e/\rho_o (H_e + P) - H_p - P)} - 1 \right) \quad \text{Équation 8}$$

4.2.2. Variables utilisées

La résolution des solutions analytiques précédentes nécessite la connaissance des variables H_e (niveau d'eau de la lagune au-dessus de la source sous-marine de la Vise), du ratio de masse volumique entre la lagune et le karst (ρ_e/ρ_o) et la charge H_p en amont dans le karst.

Variable H_e :

La profondeur de la Vise est située à -29.55 m NGF (P_{Vise}). Les évolutions de la cote d'eau de la lagune de Thau sont mesurées par le dispositif expérimental de la Vise (depuis le 25 juin 2019) ainsi que par l'établissement thermal de Balaruc à proximité du forage F14 (depuis avril 2012, avec lacunes). Les données du marégraphe de Sète (SHOM) ont été utilisées pour établir les corrélations et déphasages entre les sites de mesure. La description détaillée des données est présentée dans le § 3.3.3. Une chronique synthétique (H_{lagune}) a pu être reconstituée pour la période d'octobre 2007 à mars 2022, les lacunes d'observations ont été complétées à l'aide des données du marégraphe de Sète. La variable est définie par $H_e = P_{Vise} + H_{lagune}$.

Variable ρ_e/ρ_o :

La variable ρ_e/ρ_o est calculée à partir des masses volumiques de l'eau du karst ($\rho_o = 999$ kg/m³ supposée constante au cours des cycles hydrogéologiques) et de la masse volume de l'eau saumâtre de la lagune Thau (ρ_e) qui est variable au cours du cycle hydrologique.

La masse volumique de la lagune de Thau (ρ_e) a été estimée à partir des variations de salinité mesurées par l'Ifremer⁸ au point d'observation 104-P-001 situé à environ 1 150 m au sud-ouest de la source de la Vise. Les suivis (fréquence hebdomadaire) de salinité sur ce point de la lagune de Thau ont débuté en avril 1987, les dernières données disponibles sont le 13 décembre 2021. Les données journalières, exprimées en unité PSU⁹, ont été estimées par interpolation linéaire (Illustration 36). Sur la période du 13 décembre 2021 au 14 mars 2022, la masse volumique de la lagune Thau (ρ_e) a été estimée à partir des mesures de conductivité et température de la station de la Vise pendant le phénomène d'inversac.

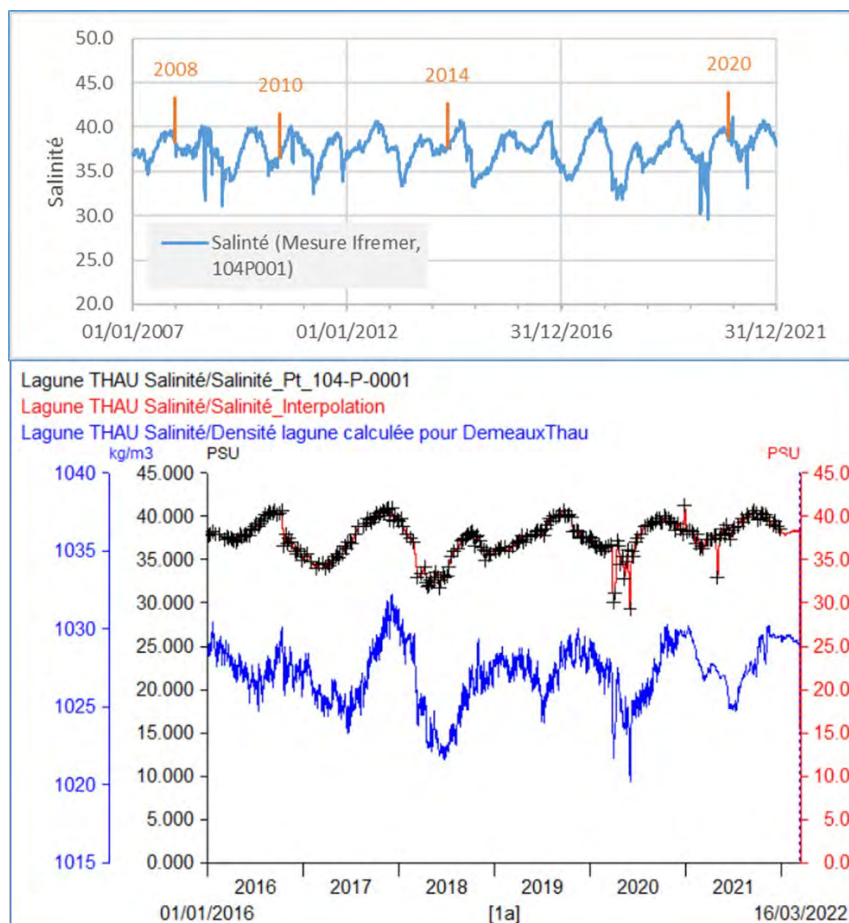


Illustration 36 : Évolution de la salinité (en unité PSU) de la lagune de Thau (Ifremer) et de la densité estimée à partir de la salinité (zoom en bas sur la période 2016-2021)

⁸ <https://wwz.ifremer.fr/surval/>

⁹ 1 PSU = 1 g de sel / kg d'eau de mer

Les informations disponibles permettent de montrer que la salinité et donc la densité des eaux de la lagune évolue au cours du cycle hydrologique, les valeurs maximales sont fréquemment observées à la fin des périodes estivales, les valeurs minimales sont fréquemment observées à la fin de l'hiver début et/ou début du printemps. Les statistiques descriptives pour chaque mois de l'année sont présentées en annexe 2.

Variable H_p :

La variable H_p décrit la charge piézométrique en amont du système karstique de la presqu'île de Balaruc. Dans l'approche, compte tenu du référentiel d'altitude défini (cf. Illustration 35) la variable H_p est définie par : $H_p = P_{\text{Vise}} + H_{pz}$ (NGF).

Le réseau d'observation déployé dans ce projet (cf. § 2.2 et 2.3) permet de caractériser les évolutions spatio-temporelles de la charge piézométrique au sein de l'aquifère. Plusieurs chroniques H_{pz} (NGF) ont donc pu être évaluées dans cette étude selon les contextes de fonctionnement hydrogéologique (en situation « normale » ou « d'inversac »), cf. ci-après.

4.2.3. Résultats en situation normale lorsque $H_p > (\rho_e/\rho_0)H_e$

En situation normale, le débit de la Vise peut être estimé à l'aide de l'équation suivante en considérant une chronique piézométrique H_p et le niveau H_e de l'eau de la lagune au-dessus de la Vise :

$$Q_{Vise}^+ = \frac{C^2}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4A^2}{C^2} (H_p - \rho_e/\rho_0 H_e)} - 1 \right) \quad \text{Équation 9}$$

La maximisation de la fonction objectif basée sur le critère de Nash¹⁰ permet la calibration des paramètres (A et C) dont les bornes inférieure et supérieure sont fixées : $A(\text{m}^2/\text{s}) = [0.01 ; 80]$; $C(\text{m}^{2.5}/\text{s}) = [0.001 ; 0.5]$.

Le réseau d'observation déployé dans le cadre du projet DEMEAUX Thau permet de tester différentes configurations « H_p » selon la localisation de l'ouvrage au sein du système karstique.

Résultats avec le piézomètre CGE-Tennis (BSS002JEHM)

Le piézomètre CGE-Tennis (BSS002JEHM) est situé à environ 2600 m de la Vise. Il capte l'aquifère captif jurassique entre 91 et 111 m de profondeur sous couverture miocène.

L'évolution des débits observés à la Vise et simulés sur la période du 25 juin 2019 au 27 novembre 2020, c'est-à-dire entre la mise en place du suivi et le début de l'inversac de 2020, est donnée à l'illustration suivante (Illustration 37). Les évolutions du ratio ρ_e/ρ_0 et de la cote du plan d'eau de la lagune et de la piézométrie sont également reportées.

Le débit moyen journalier de la Vise est globalement bien reproduit en considérant les informations piézométriques de l'ouvrage CGE-Tennis en entrée (H_{pz}) pour la combinaison suivante des paramètres A et C : $A=0.0827 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.2422 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$.

¹⁰ Nash-Stucliff Efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970)

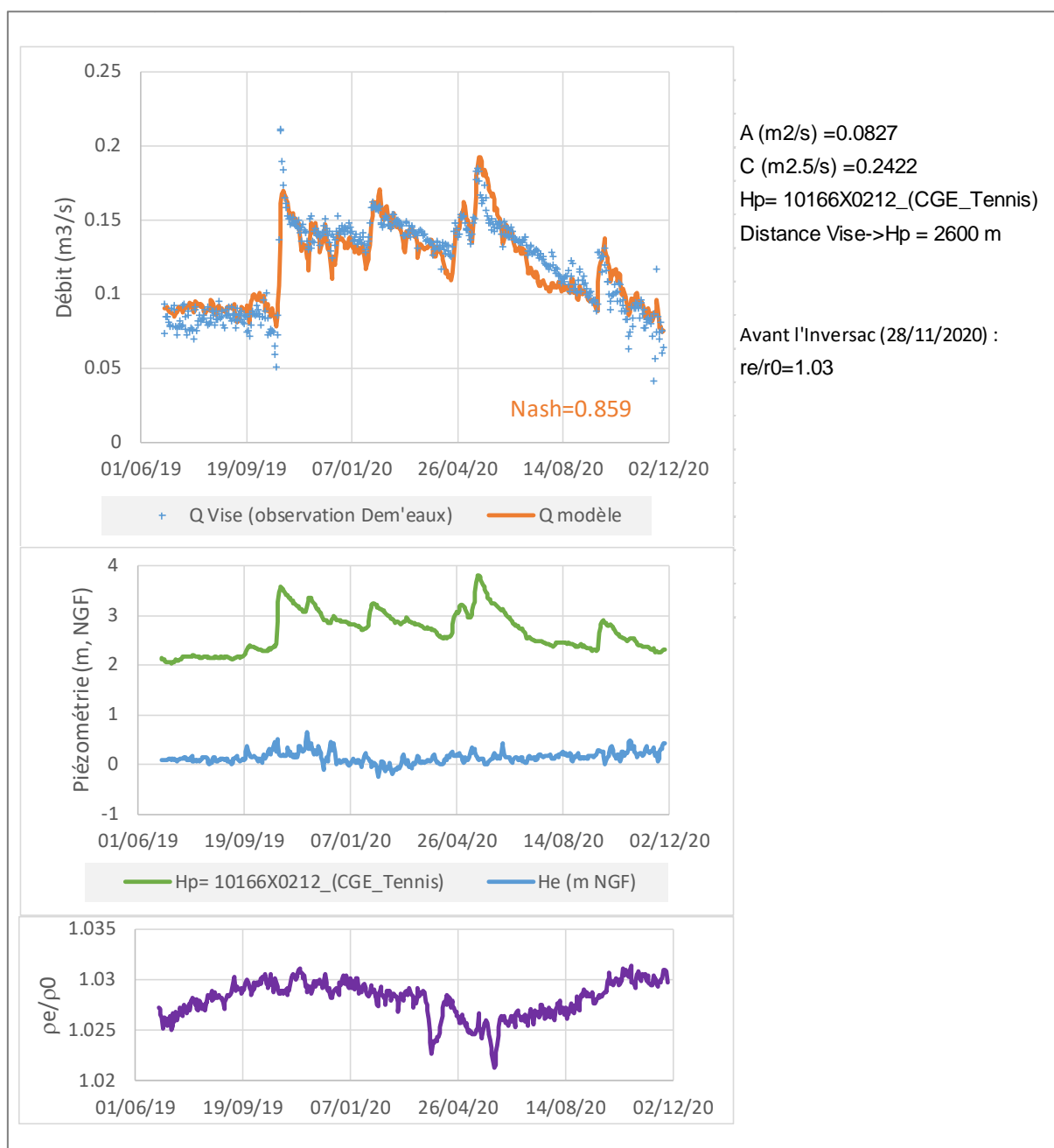


Illustration 37 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio pe/ρ_0 et les variations piézométrique du piézomètre amont CGE-Tennis (BSS002JEHM)

Résultats avec le piézomètre P4-Balme (BSS002JEKE)

Le piézomètre P4-Balme (BSS002JEKE) est situé à environ 2850 m de la Vise. Il capte l'aquifère libre jurassique entre 50 et 100 m de profondeur. L'évolution des débits observés à la Vise et simulés sur la période du 25 juin 2019 au 27 novembre 2020 est donnée à l'illustration suivante (Illustration 38).

Les évolutions du ratio ρ_e/ρ_0 et de la cote du plan d'eau de la lagune ainsi que la piézométrie de l'ouvrage considéré (P4-Balm) sont également reportées. Là encore, les débits moyens journaliers de la Vise sont globalement bien reproduits par le modèle en considérant en entrée (Hpz) les informations de l'ouvrage P4-Balm et la combinaison suivante des paramètres A et C : $A=0.63 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.1319 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$.

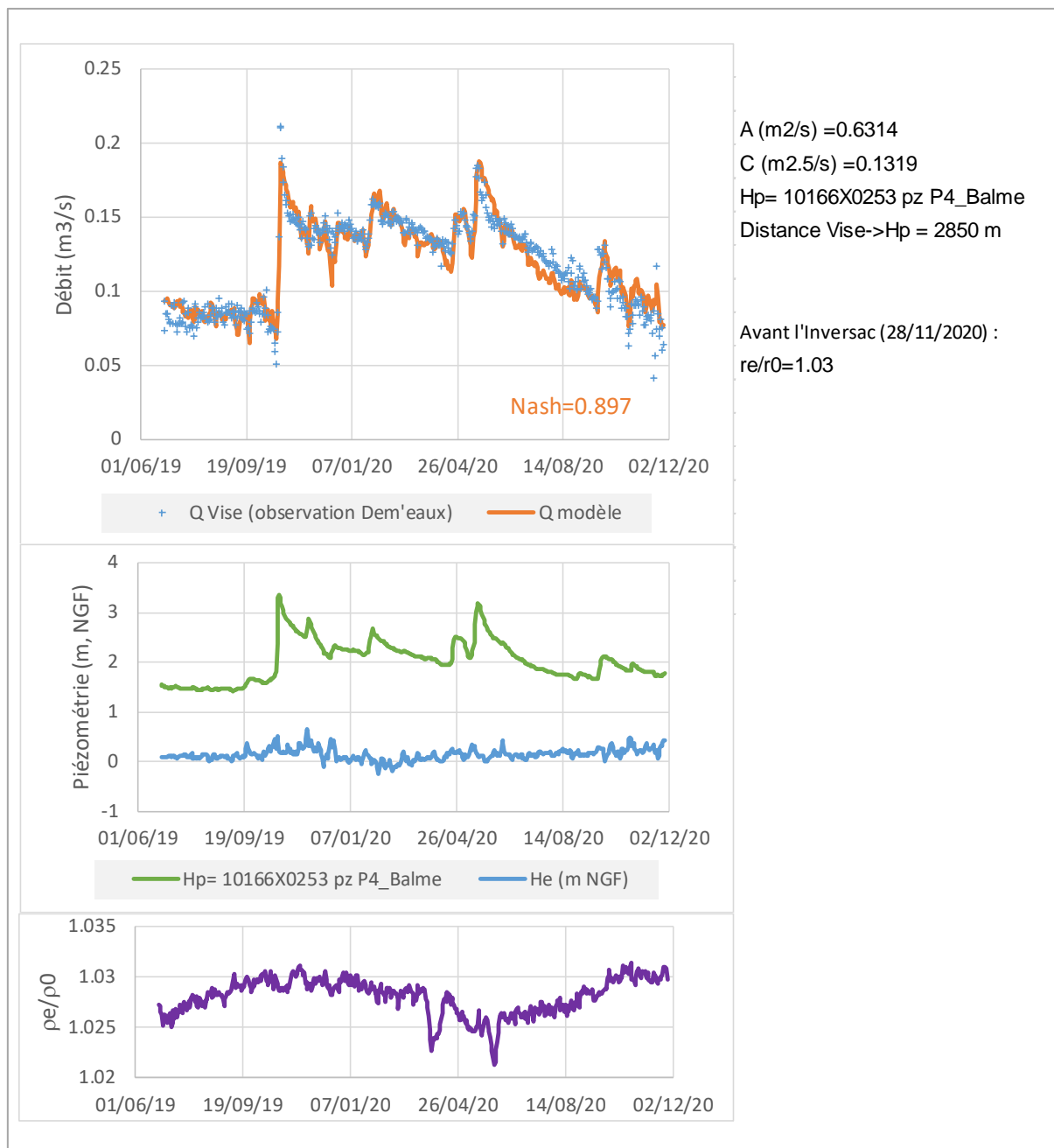


Illustration 38 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio ρ_e/ρ_0 et les variations piézométriques du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE)

Résultats avec une combinaison linéaire de piézomètres

Des simulations ont été réalisées en considérant des chroniques synthétiques calculées par combinaison linéaire de réponses piézométriques observées au sein de la presqu'île de Balaruc (Illustration 39 et Illustration 40). L'évolution du ratio p_e/p_0 est identique aux chroniques précédentes. Le paramètre de diffusivité A n'est pas fixé.

Dans le premier test (Illustration 39), la chronique synthétique est calculée à partir des chroniques des piézomètres F5-Autoroute (profondeur du toit du Jurassique = -181 m NGF), CGE_Tennis (profondeur du toit du Jurassique = -79 m NGF) et P4-Balme (réservoir jurassique affleurant) dans le but d'évaluer l'influence des différentes composantes aquifères selon la profondeur du toit du Jurassique. Les débits simulés permettent de bien reproduire les observations (Nash=0.91, pour $A=25 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.12 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$), le critère de Nash est légèrement supérieur à ceux des simulations précédentes avec CGE-Tennis (Nash=0.89 pour $A=0.083 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.242 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$) et P4-Balme (Nash=0.89 pour $A=0.63 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.1319 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$). Toutefois, la chronique synthétique calculée (H_p) apparaît très comparable à celle de l'ouvrage P4-Balme (Illustration 39). Le poids de la chronique CGE-Tennis est très faible ce qui indique que l'information hydrogéologique portée par cette variable est comparable à celle du piézomètre P4-Balme (variables fortement corrélées). Une conclusion similaire est faite pour la variable F5-Autoroute. Dans ce contexte, la prise en compte d'une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée n'apporte pas davantage d'information que la chronique P4-Balme seule.

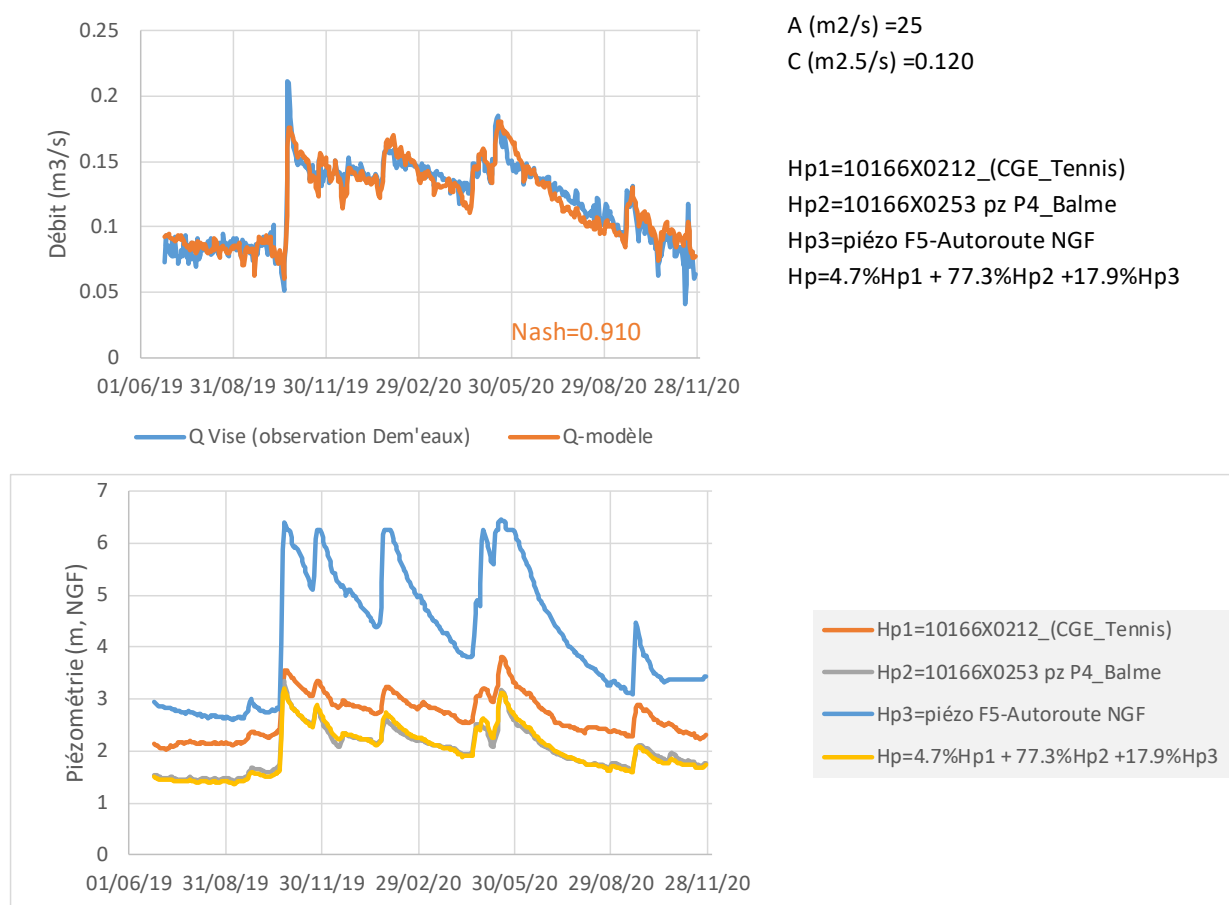


Illustration 39 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune et une chronique synthétique calculée par une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée au sein de la presqu'île de Balaruc

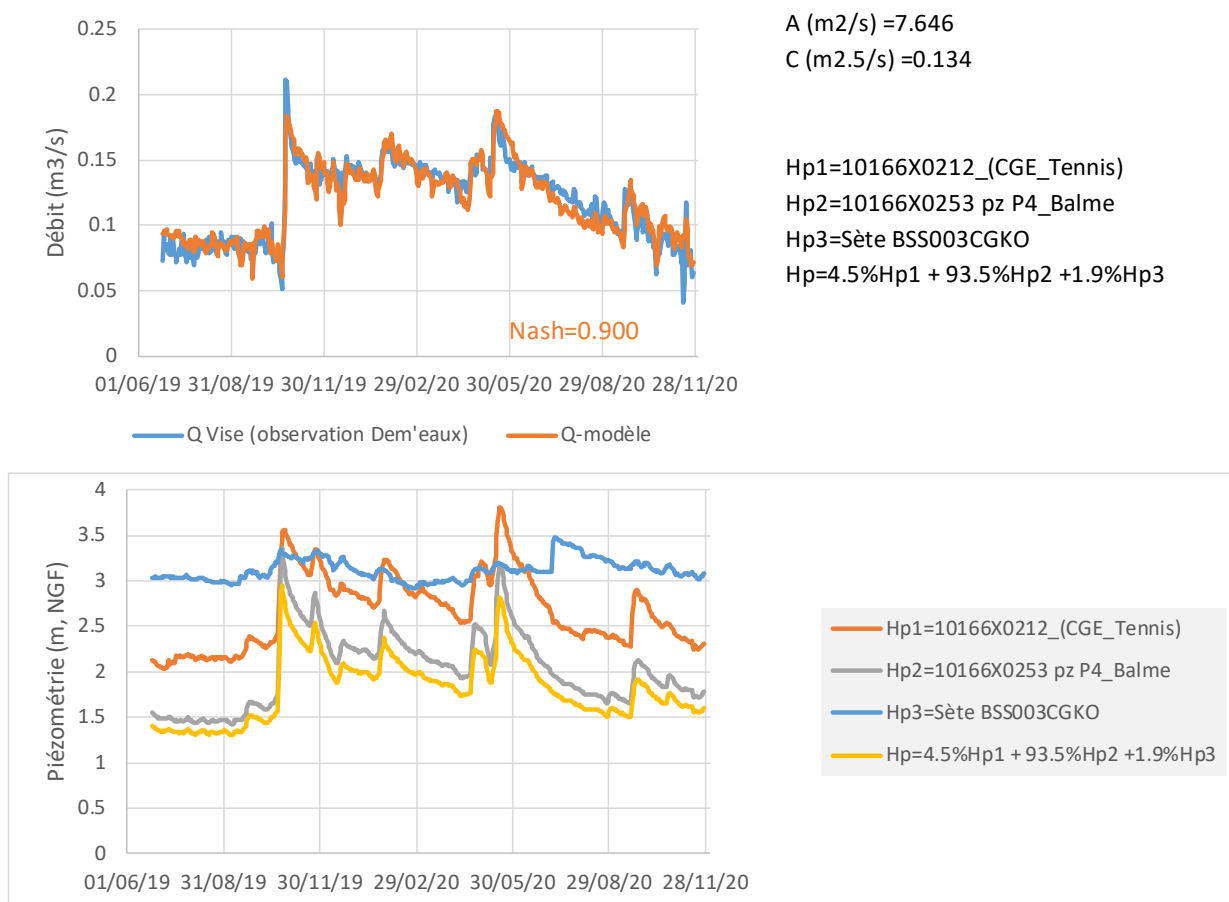


Illustration 40 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune et une chronique synthétique calculée par une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée au sein de la presqu'île de Balaruc et à Sète

Dans le second test (Illustration 40), la chronique synthétique est calculée à partir des chroniques des piézomètres de CGE_Tennis, P4-Balme et de l'ouvrage Stade Michel à Sète dans le but d'évaluer pour ce dernier, si ce compartiment aquifère peut contrôler une partie des évolutions des débits mesurés à la Vise. Les débits simulés permettent de bien reproduire les observations (Nash=0.90, pour $A=7.65 \text{ m}^2/\text{s}$ et $C=0.134 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$), le poids de la chronique de l'ouvrage Stade Michel à Sète dans la combinaison linéaire est très faible. Ces résultats laissent suggérer que les débits de la Vise ne sont pas contrôlés par la zone hydrogéologique 4 précédemment définie (cf. Illustration 6). Là encore la chronique synthétique calculée (Hp) apparaît très comparable à celle de l'ouvrage P4-Balme. Dans ce contexte, la prise en compte d'une combinaison linéaire de réponse piézométrique observée n'apporte pas davantage d'information que la chronique P4-Balme seule.

Le coefficient de perte de charge dans le conduit entre l'exutoire de la source de la Vise et le toit du jurassique (paramètre C) est compris entre 0.12 et 0.24 $\text{m}^{2.5}/\text{s}$ selon les résultats des simulations ($C=0.1257 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$ pour P4-Balm seul). Ces valeurs apparaissent globalement très proches. Le test de sensibilité suivant (cf. Illustration 41) permet d'évaluer l'effet de la valeur du paramètre C sur la qualité des simulations (A fixé à 20 m^2/s). Pour une chronique piézométrique considérée en entrée, la valeur du paramètre C contrôle fortement les résultats de la simulation comme le témoigne la comparaison de la figure suivante (Illustration 41).

D'une manière très globale, plus la valeur de C est grande, plus le débit et l'amplitude de variation du débit simulé sont importants, pour une charge piézométrique H_p considérée en entrée. Dans ce contexte, le choix de la chronique piézométrique conditionne fortement la valeur du paramètre C lorsque le paramètre A est fixé.

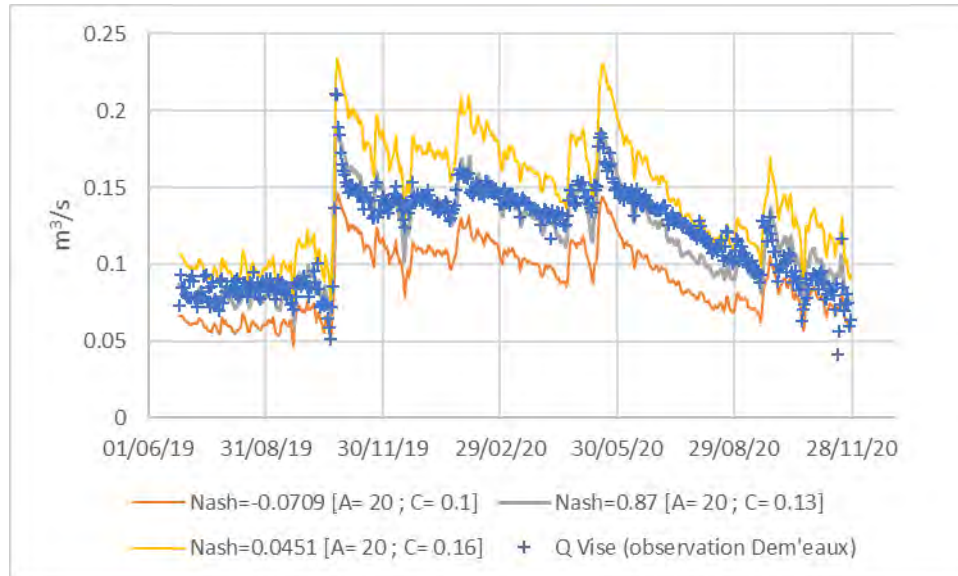


Illustration 41 : Comparaison des résultats des simulations des débits de la Vise pour différentes configurations du paramètre C (A fixé à 20 m²/s) en considérant les variations de niveau de la lagune et les variations piézométriques du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE)

Résultats avec une prise en compte des pompages à proximité de la Vise

La solution analytique (équation 9) ne prend pas en compte l'effet induit par les pompages d'eau souterraine de la presqu'île de Balaruc notamment au voisinage proche de la Vise. Les principaux prélèvements connus sont ceux des forages thermaux sur la composante thermique de l'aquifère (de l'ordre de 60 m³/h dans les mois qui précèdent le déclenchement de l'inversac 2020, F5, F8, F9, F14) et au niveau du forage F6 (de l'ordre de 10 m³/h) dans la zone de mélange entre l'eau du karst et l'eau thermique (cf. L5a, [BRGM/RP-71281-FR](#)).

Dans le but de prendre en considération l'influence des pompages sur la charge piézométrique dans le karst au droit de la Vise, la méthode de De Glee (1930, 1951, cité par Kruseman et de Ridder (2000)) a été mise en œuvre. Cette solution permet la prise en compte de l'effet de drainance. Cette solution permet de calculer le rabattement, pour l'état stationnaire, elle utilise les fonctions de Bessel modifiées.

$$s(r) = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{L}\right) \quad \text{Équation 10}$$

avec $s(r)$: rabattement (m) à une distance r du forage, T : transmissivité (m²/s), r : distance au forage (m), Q : débit de pompage (m³/s), S : coefficient d'emmagasinement (-) ; K_0 : fonction de Bessel modifiée de deuxième espèce et d'ordre zéro ; L : facteur de fuite (m) = $(T \cdot e / k')^{0.5}$; e : épaisseur d'éponte ; $k' = 1 \times 10^{-7}$ m/s.

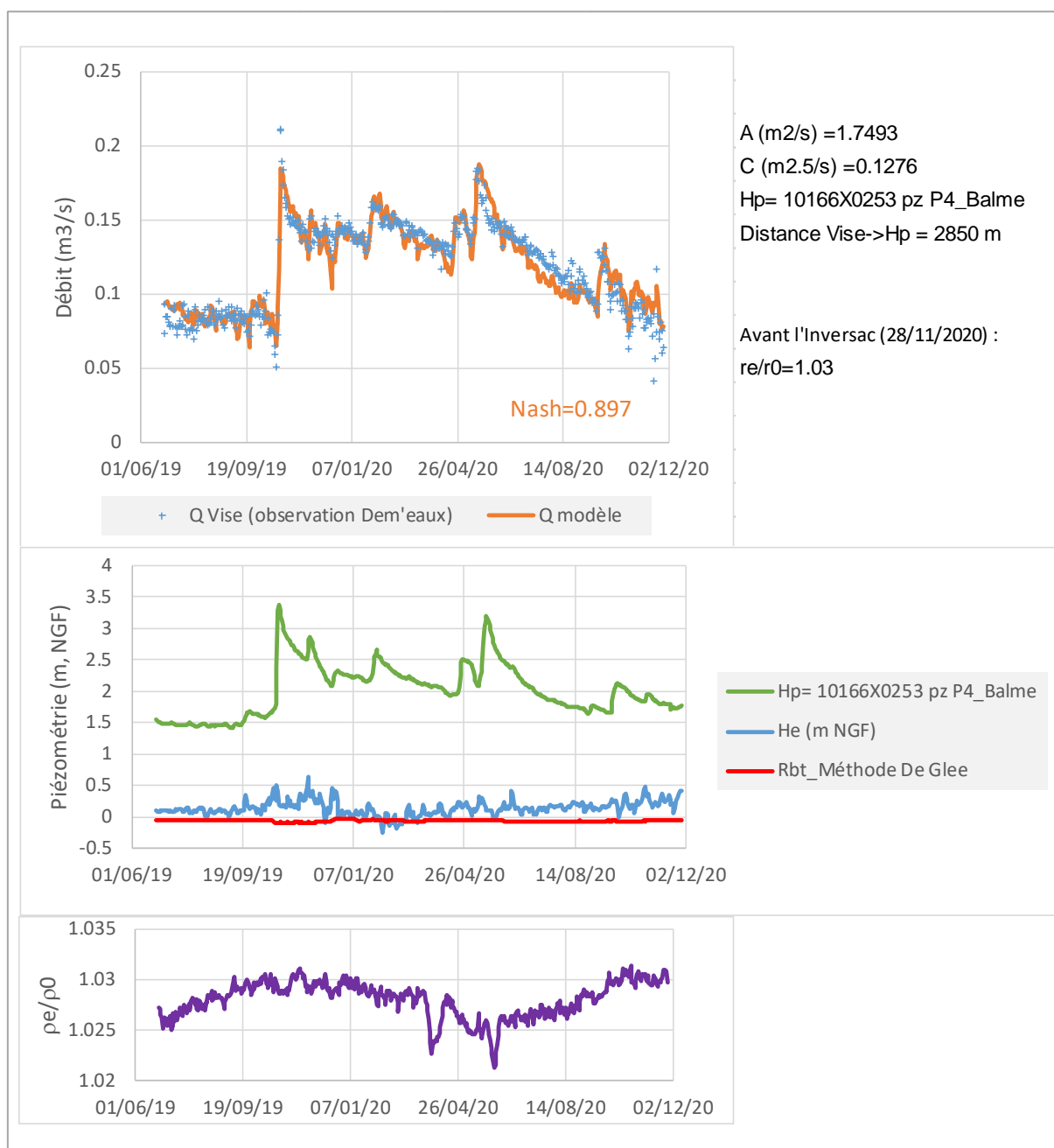


Illustration 42 : Simulation des débits de la Vise en considérant les variations de niveau de la lagune, les variations du ratio ρ_e/ρ_0 , les variations piézométriques du piézomètre amont P4-Balme (BSS002JEKE) et l'estimation des rabattements provoqués par les forages situés au voisinage de la Vise

L'évolution des débits observés à la Vise et simulés par ce nouveau modèle sur la période du 25 juin 2019 au 27 novembre 2020 est présentée dans l'illustration 42. Les évolutions du ratio ρ_e/ρ_0 , de la cote du plan d'eau de la lagune, de la piézométrie de l'ouvrage considéré (P4-Balm) ainsi que l'évolution du rabattement provoqué par les pompages connus des forages (F5+F6+F9+F14+F8+S12) sont également reportées. Les débits moyens journaliers de la Vise sont globalement bien reproduits par le modèle (Nash= 0.862) en considérant en entrée (H_{pz}) les informations de l'ouvrage P4-Balm et la combinaison suivante des paramètres A et C : $A=1.75 \text{ m}^2\text{/s}$ et $C=0.1276 \text{ m}^{2.5}\text{/s}$.

4.2.4. Résultats en période d'inversac lorsque $H_p < (\rho_e/\rho_0) \cdot (H_e + P) - P$

En situation d'inversac, une hausse plus ou moins brutale du niveau d'eau de l'aquifère est observée dans la plupart des piézomètres du réseau d'observation (cf. § 3.5). Pour l'ouvrage P4-Balm, la hausse piézométrique est en moyenne de +1.17 m (± 0.14 m) sur la période d'observation de l'inversac (28 novembre 2020 au 14 mars 2022, cf. Illustration 43). Pour prendre en compte ce phénomène, la variable H_p^* est définie pour corriger son influence dans la modélisation analytique :

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

Avec $H_p^* = H_p - \text{correction} = H_p - 1.17$ m

Compte tenu de l'importance de la correction à apporter et des incertitudes associées (+1.17 m (± 0.14 m)), l'effet des rabattements induits par les pompages n'a pas été considéré car le rabattement induit par les pompages connus (< 0.1 m) est inférieur à l'incertitude sur la valeur de la correction.

En situation d'inversac, l'élévation globale du niveau piézométrique au sein de la presqu'île de Balaruc conduit probablement à une modification des paramètres hydrodynamiques du milieu aquifère. Dans ce contexte, le paramètre A qui représente la diffusivité moyenne du milieu karstique aquifère est vraisemblablement modifié par rapport à la situation de fonctionnement normale. De même, l'intrusion d'eau saumâtre dans le conduit karstique doit probablement modifier la valeur du paramètre C qui représente le « coefficient de transmissivité » du conduit karstique. Le calage de ces paramètres repose sur la maximisation de la fonction objectif basée sur le critère de Nash¹¹, les bornes inférieure et supérieure sont fixés : $A(\text{m}^2/\text{s}) = [0.01 ; 80]$; $C(\text{m}^{2.5}/\text{s}) = [0.001 ; 0.5]$. Trois modélisations ont été réalisées en considérant les valeurs suivantes du paramètre de correction : (1) correction = -1.17 ; (2) correction = -1.17+0.14 ; (3) correction = -1.17-0.14 ce qui permet d'évaluer l'incertitude sur les paramètres A et C.

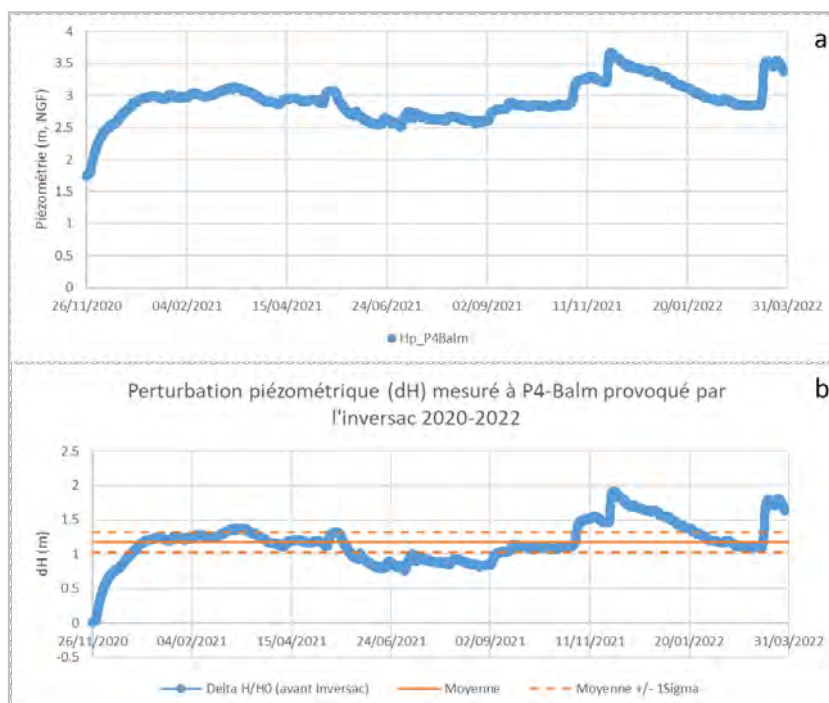


Illustration 43 : (a) Évolution de la piézométrie mesurée à P4-Balm au cours de l'inversac 2020-2022 (28/11/2020 au 13/03/2022). (b) Évolution de l'amplitude de la perturbation piézométrique mesurée à P4 Balm par rapport à la situation pré-inversac.

¹¹ Nash-Stucliff Efficiency (Nash and Sutcliffe, 1970)

L'évolution des débits observés lors de l'inversac de 2020-2022 est donnée à l'illustration suivante (Illustration 44), les débits simulés permettent de reproduire les observations de manière jugée satisfaisante (Nash=0.55).

En contexte d'inversac, le « coefficient de transmissivité » (C) du conduit karstique est estimé à $0.234 \text{ m}^{2.5}/\text{s} \pm 0.015 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$, la valeur apparaît supérieure (d'un facteur 2) à la valeur précédemment estimée en condition de fonctionnement normal ($C = 0.1276 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$ modèle P4-Balm avec pompage) ce qui suggère que les pertes de charge dans le conduit sont diminuées par rapport à la situation de référence (contexte normal). Le paramètre A qui représente le coefficient de diffusivité moyen du milieu karstique aquifère est diminué ($A = 0.319 \text{ m}^2/\text{s} \pm 0.082 \text{ m}^2/\text{s}$) par rapport à la situation de référence ($A = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$) définie par le modèle P4-Balm avec pompage.

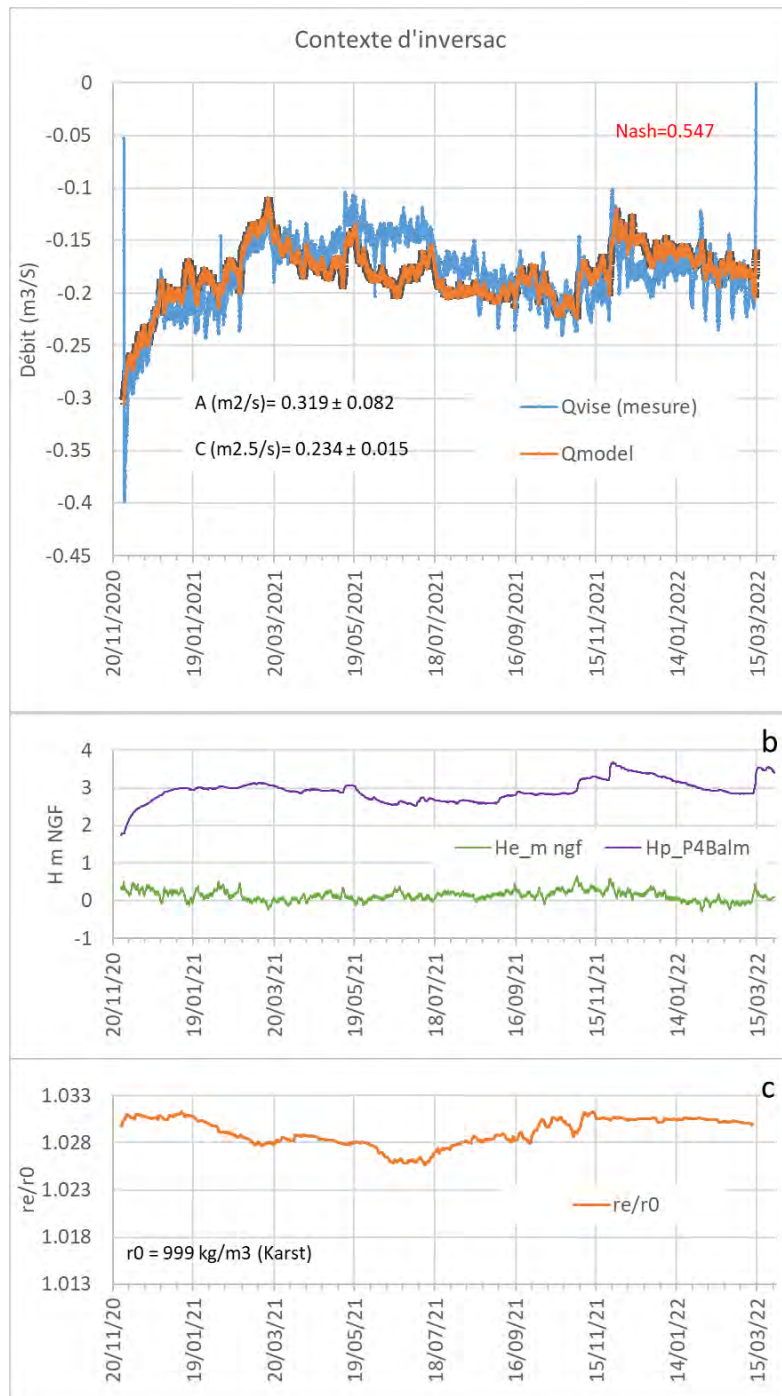


Illustration 44 : (a) débits mesurés et simulés à la Vise lors de l'inversac 2020-2022, (b) chroniques mesurées des niveaux d'eau (aquifère et étang) ; (c) évolution du ratio des masses volumique (r_e/r_0) de la lagune de Thau au droit de la Vise (calculé à partir des suivis de conductivité et température de l'eau) et de l'eau du karst (supposé constante = $999 \text{ kg}/\text{m}^3$)

4.2.5. Synthèse

Dans cette étude, deux solutions analytiques ont été développées pour décrire et reproduire les évolutions du débit de la source sous-marine de la Vise en situation normale (modèle 1 hors inversac) et en période d'inversac (modèle 2). Les modèles développés reposent sur un nombre limité de paramètres (respectivement [A et C] et [A, C, P]) et utilisent en entrée les évolutions mesurées dans le karst (piézométrie en amont hydraulique à plus de 2.6 km de la Vise), les variations de la cote du plan d'eau et de la salinité de la lagune de Thau. Différents tests ont été réalisés pour apprécier la sensibilité des modèles aux différentes chroniques d'entrées considérées. Les résultats indiquent que la piézométrie mesurée en amont (P4-Balm ou CGE-Tennis) permet de reproduire de manière jugée très satisfaisante les débits observés entre juin 2019 et le 27 novembre 2020 (avant l'inversac).

Les solutions analytiques ne prennent pas en compte l'effet induit par les pompages d'eau souterraine de la presqu'île de Balaruc notamment au voisinage proche de la Vise. Dans le but de prendre en considération l'influence des pompages sur la charge piézométrique dans le karst au droit de la Vise, la méthode de De Glee a été utilisée pour estimer l'importance du rabattement cumulé induit par les pompages. La correction concerne la variable H_p du modèle 1. Les résultats des simulations du modèle modifié ont été jugés satisfaisants ce qui a amené dans la suite du travail (cf.§ 6.1.1) au développement d'un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac en fonction des principaux paramètres qui contrôlent l'évolution du débit de la Vise (H_p , H_e , ratio de densité entre l'eau de la lagune et l'eau du karst amont, rabattement cumulé lié aux pompages connus ($F5+F6-F9+F14+F8+S12$)).

Pour le modèle 2 (en période d'inversac), l'élévation globale du niveau piézométrique au sein de la presqu'île observée dans les jours qui suivent le phénomène d'inversac nous a amené à corriger son influence dans la modélisation analytique par rapport à la situation de référence (hors inversac). Pour le piézomètre de référence P4-Balm la correction moyenne est estimée à -1.17 m (± 0.14). L'élévation globale du niveau piézométrique au sein de la presqu'île de Balaruc conduit probablement à une modification des paramètres hydrodynamiques du milieu aquifère comme le suggèrent les résultats des simulations. En effet le paramètre A qui représente la diffusivité moyenne du milieu karstique aquifère est diminué ($A=0.319 \text{ m}^2/\text{s} \pm 0.082 \text{ m}^2/\text{s}$) par rapport à la situation de référence ($A= 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ modèle 1 P4-Balm avec prise en compte des pompages). Par ailleurs, le « coefficient de transmissivité » (C) du conduit karstique est augmenté d'un facteur 2 ($0.234 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$ contre $C = 0.1276 \text{ m}^{2.5}/\text{s}$) ce qui suggèrent que les pertes de charge dans le conduit entre la source et le toit du Jurassique sont diminuées par rapport à la situation de référence (contexte normal). L'évolution des débits horaires simulés lors de l'inversac de 2020-2022 permet de reproduire les observations de manière jugée satisfaisante. Les résultats ont amené dans la suite du travail (cf.§6.1.2) au développement d'un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer les possibilités de fin du phénomène d'inversac à partir des principaux paramètres qui contrôlent l'évolution du débit d'absorption de la Vise au cours de ces périodes (H_p , H_e , ratio de densité entre l'eau de la lagune et l'eau du karst amont).

4.3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS ET DU TRANSPORT DE SEL

4.3.1. Description du modèle

Un modèle numérique à éléments finis a été mis en œuvre pour simuler les mécanismes du phénomène d'inversac. L'objectif de cette modélisation est de reproduire les processus et non pas de tenter de simuler fidèlement les observations de niveaux et débits.

Le modèle consiste en une coupe verticale 2D d'un aquifère captif d'une épaisseur $e = 300$ m, situé sous un aquiclude d'une épaisseur P égale à 70 m. Un conduit fortement perméable situé à son toit au centre du domaine modélisé permet la connexion avec une masse d'eau salée d'une épaisseur de 31 mètres représentant l'étang de Thau (Illustration 45). La diffusivité de l'aquifère D est égale à $25 \text{ m}^2/\text{s}$, conformément aux résultats obtenus lors de la modélisation analytique ci-avant (§ 4.1.2) et à l'interprétation des essais de pompage sur ce site.

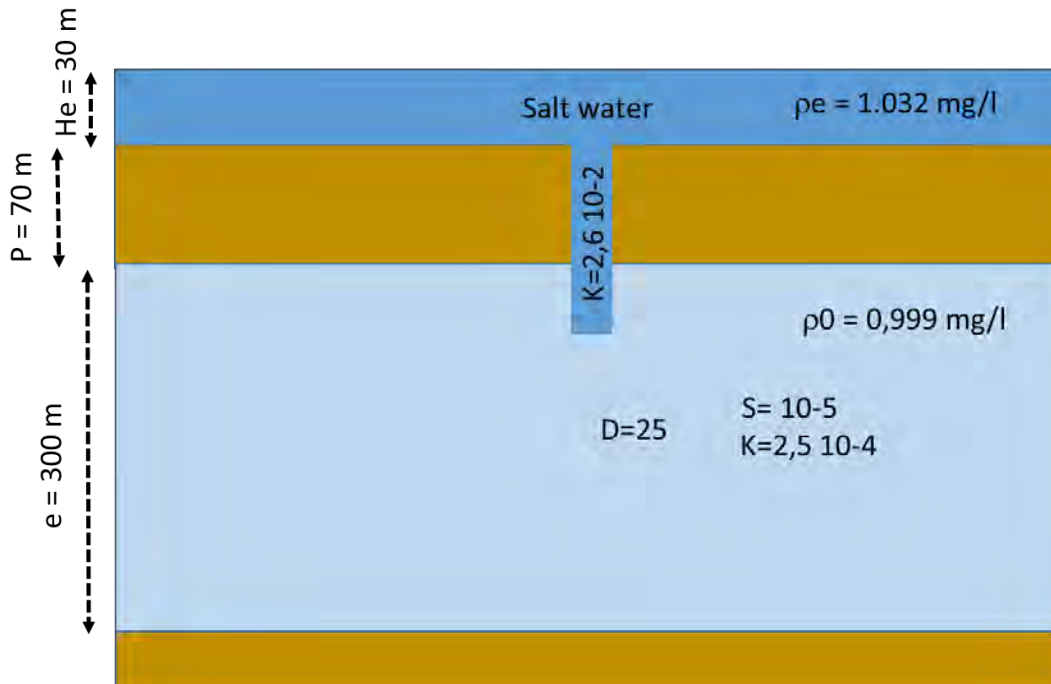


Illustration 45 : Schéma (coupe hydrogéologique 2D verticale) du modèle numérique mis en œuvre

4.3.2. Résultats de la simulation

Le scénario modélisé permet de reproduire deux cycles hydrologiques avec des conditions de hautes et basses eaux dans l'aquifère. L'étang subit par ailleurs deux événements identiques de courte durée, séparés de 6 mois. Chaque événement consiste en une montée-descente triangulaire de niveau de 1 m en seulement 7 jours, lié par exemple à une tempête sur l'étang. Lors du premier événement (démarrant après 30 jours de simulation), le niveau dans l'aquifère est à une hauteur de +3 mNGF à la limite amont de l'aquifère (à 4000 m du conduit) et il n'y a pas d'inversion induite des flux. Par contre, lorsque le deuxième événement survient après 210 jours, la hauteur piézométrique dans la nappe (à 4000 m) était graduellement descendue à +2.5 m NGF (suite à une baisse liée à l'absence de pluie par exemple), ce qui génère un puissant inversac qui ne disparaît qu'après remontée de la hauteur piézométrique dans la nappe (à 4000 m) à + 5 m NGF suite à un important épisode de recharge par exemple. La situation normale est ensuite retrouvée lorsque les niveaux d'eau dans l'aquifère repassent de + 5 mNGF graduellement à +3 mNGF, comme au début.

Les résultats mettent en évidence la succession de trois phases majeures :

- phase 1 : situation normale (entre $t = 0$ et $t = 210$ j) : les débits à l'exutoire sont positifs (ascendants de l'aquifère vers l'étang) et proportionnels à la charge hydraulique imposée à l'amont de l'aquifère (oscillant entre + 3 et + 2.5 mNGF) : ils oscillent entre 60 et 40 L/s. La forte hausse de niveau d'eau de l'étang (à $t = 30$ j) induit une baisse subite du débit à l'exutoire mais n'induit pas d'inversac ;
- phase 2 : situation d'inversac (entre $t = 210$ et $t = 445$ j) : suite à une forte hausse du niveau de l'étang concomitante à un niveau dans l'aquifère plus faible, les débits à l'exutoire deviennent

négatifs (descendants de l'étang vers l'aquifère). Par ailleurs, un rebond piézométrique est observé dans les piézomètres (courbe verte pour un piézomètre situé à 100 m du conduit) au moment de l'inversac ($t = 210$ j) comme c'est le cas dans la réalité ;

- phase 3 : situation normale (entre $t = 445$ et $t = 730$ j) : suite à une remontée du niveau piézométrique à l'amont de l'aquifère (induite par exemple par une forte pluie), les débits à l'exutoire redeviennent positifs : la situation redevient normale avec des flux ascendants au sein du conduit karstique.

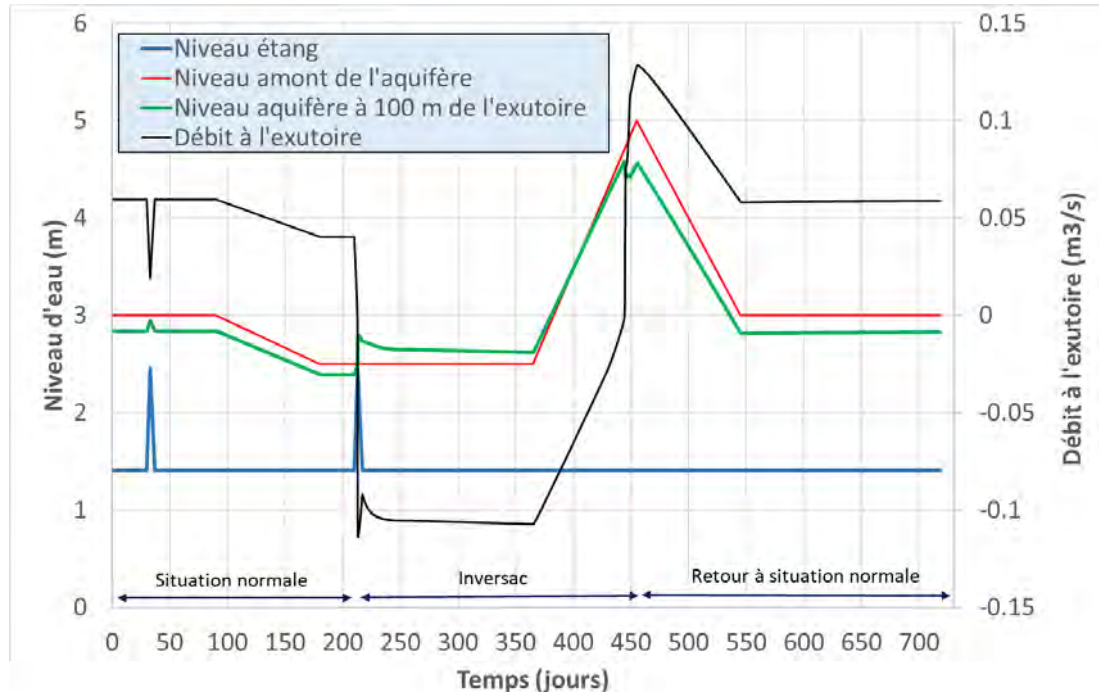


Illustration 46 : Évolution des niveaux d'eau et débit simulés par le modèle numérique

La variation spatiale de la piézométrie simulée est représentée à l'illustration 47. On constate l'existence d'un « cône de rabattement piézométrique » (courbe bleue) autour du conduit karstique en condition normale (hors inversac). Celui-ci induit des écoulements radiaux vers le conduit (flèche bleue). En condition d'inversac (courbe rouge), on observe la mise en place d'un dôme piézométrique induisant des écoulements radiaux vers l'extérieur (flèche rouge). La différence de charge hydraulique entre les courbes bleue et rouge correspond à l'impact du rebond piézométrique induit par l'inversac et lié à l'impact du contraste de densité entre eau douce et eau salée au sein du conduit karstique.

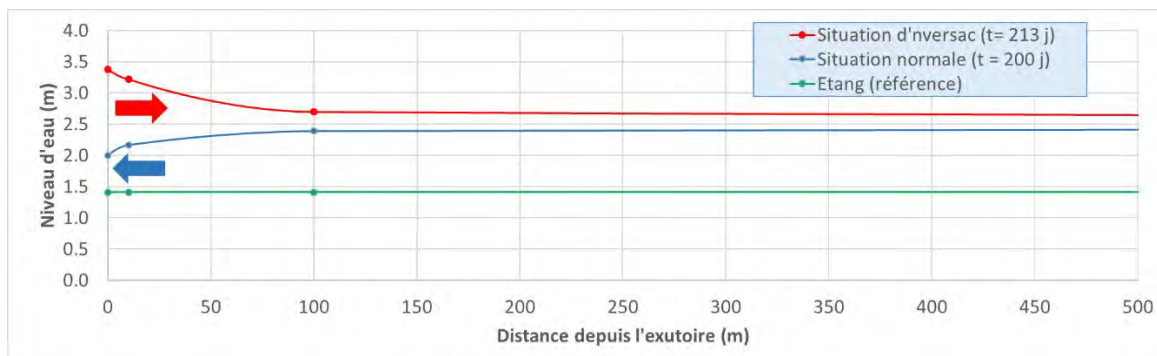


Illustration 47 : Évolution des niveaux d'eau simulés en fonction de la distance au conduit karstique (en bleu : situation normale ; en rouge : situation d'inversac)

5. Premiers résultats après l'arrêt d'un phénomène (inversac 2020-2022)

L'inversac de 2020-2022 d'une durée de 471 jours a débuté le 28 novembre 2020 à 09h40 et s'est terminé le 14 mars 2022. Ce chapitre présente de manière succincte, à titre d'information, les premières évolutions mesurées après l'arrêt du phénomène (14 mars 2022 au 30 avril 2022). L'exploitation détaillée des résultats acquis depuis le 14 mars 2022 ne sera pas réalisée dans le cadre de ce rapport et du projet DEM'Eaux Thau qui se termine en juin 2022.

5.1.1. Évolution du débit et de la piézométrie au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (inversac 2020-2022)

Dans les jours qui précèdent l'arrêt de l'inversac (Illustration 48), les débits d'absorption de la Vise vers le karst étaient de l'ordre de -200 L/s. La température de l'eau salée de la lagune était de 10 °C environ. Dans les heures qui précèdent la fin de l'inversac, les niveaux d'eau de la lagune étaient élevés (+0.35/+0,4 m NGF).

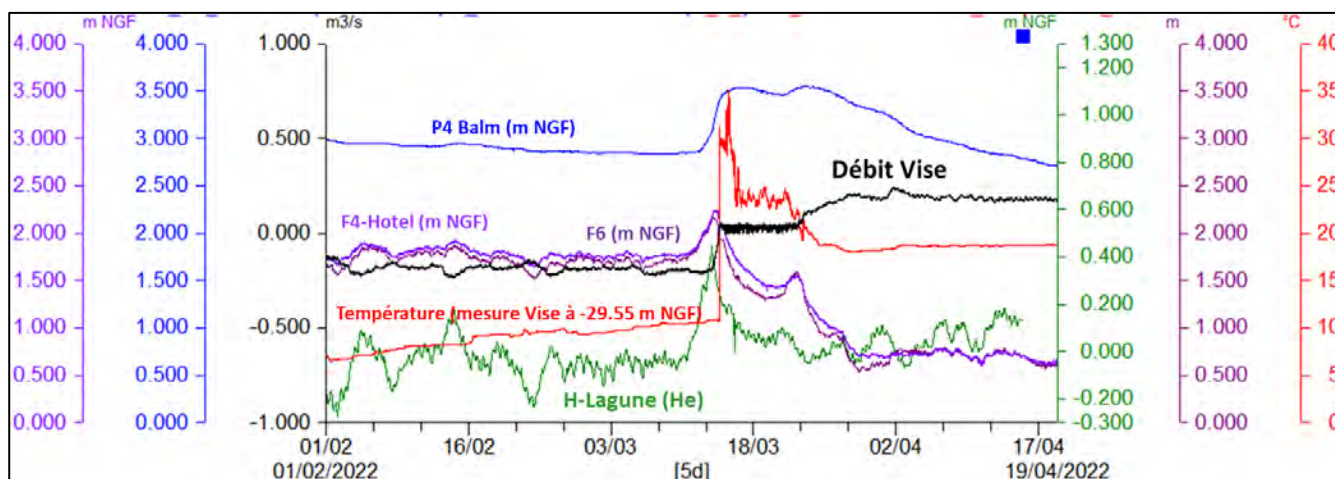


Illustration 48 : Évolution du débit mesuré à la Vise entre le 01 février 2022 et le 19 avril 2022. La piézométrie mesurée au sein de la presqu'île de Balaruc, le niveau de la lagune ainsi que la température de l'eau mesurée à -29 m de profondeur dans la Vise sont également reportés.

L'épisode pluvieux du 11/13 mars 2022 (>100 mm sur la zone d'étude) a provoqué une augmentation généralisée de la piézométrie au sein du système karstique à partir du 12 mars 2022, le pic piézométrique à P4-Balm (point de référence pour le suivi de la piézométrie du karst) s'est produit près de 48 h plus tard après l'arrêt du phénomène d'inversac. Le débit d'absorption de la Vise a commencé à diminuer dès que le niveau de la lagune a commencé à baisser (13 mars 2022 à partir de 17h00), à cet instant la charge dans le karst est de 3.09 m NGF. Le débit de la Vise s'est inversé lorsque la piézométrie mesurée à P4-Balm a atteint 3.4 m NGF ; à cet instant le niveau de la lagune était de +0.25 m NGF.

Le débit de la source dans les premières heures après l'inversac jusqu'au 22 mars 2022 16h00 a été très faible (autour de 20 L/s), la température de l'eau était importante (autour de 30/35 °C) puis s'est stabilisée autour de 25 °C. Dans le voisinage immédiat de la Vise (ouvrages F4-Hotel et F6), la piézométrie a rapidement et fortement chuté suite à la fin de l'inversac (le phénomène transitoire de baisse des niveaux d'eau a duré plus de 15 jours, les niveaux piézométriques de F6 et F4 sont comparables depuis le 02 avril 2022).

Le débit de la Vise a fortement augmenté à partir du 22 mars 2022 suite à la recharge de l'épisode pluvieux du 20/21 mars 2022 (>40 mm sur la zone d'étude) lorsque, de manière concomitante, les niveaux piézométriques dans le voisinage de la Vise (F4-Hotel et F6) ont de nouveau fortement chuté ; à ce moment-là, le niveau de la lagune est de 0m NGF et la piézométrie à P4-Balm de 3.54 m NGF.

Depuis le début du mois d'avril, le débit de la Vise fluctue autour de +150 L/s. La modélisation du débit de la Vise à l'aide de l'approche analytique développée dans cette étude (§ 4.2.3) ne peut pas être menée pour le moment en raison de l'absence de données sur l'évolution de la salinité de la lagune suite aux épisodes pluvieux de mars 2022.

5.1.2. Évolution de la conductivité électrique des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (Inversac 2020-2022)

Les évolutions de la conductivité électrique des eaux de la presqu'île de Balaruc sont présentées (Illustration 49 et Illustration 50).

Deux phases d'évolutions sont distinguées. La première concerne la période du 14 mars 2022 au 22 mars 2022, la seconde concerne la période postérieure au 22 mars 2022.

Au cours de la première période, la conductivité de la Vise diminue lors de la phase d'augmentation de la température, puis ré-augmente pour se stabiliser autour de 40 mS/cm. La réponse observée suggère la mobilisation dans un premier temps d'une eau à caractère thermal puis dans un second temps une eau saumâtre qui présente une conductivité électrique nettement plus élevée que celles mesurées aux ouvrages F4 et F6 (autour de 25 mS/cm et 27 mS/cm, respectivement) ou dans les ouvrages thermaux. Au cours de la première période, la conductivité électrique de l'ouvrage F4 évolue peu contrairement aux eaux du forage F6 pour lesquelles on observe l'amorce d'une importante diminution. Pour la source Cauvy, la diminution de la minéralisation s'observe dès que le débit de la Vise redevient positif (>0 L/s).

Lors de la seconde période (après le 22 mars 2022), la conductivité de la Vise amorce une chute importante, les valeurs tendent à se stabiliser autour de 10 mS/cm depuis la fin du mois d'avril. Une chute concomitante est également observée pour l'ouvrage F4, les eaux demeurent toutefois nettement plus minéralisées que celles de la Vise. Les conductivités des eaux de l'ouvrage F6 apparaissent assez proches de celle de la Vise depuis le mois d'avril et sont significativement moins minéralisées que celles mesurées dans F4. Les conductivités électriques mesurées mi-avril (autour de 10 mS/cm dans F4 et 18 mS/cm dans F6) demeurent très significativement supérieures à celles mesurées avant l'inversac (2.9 mS/cm et 3.9 mS/cm, respectivement pour F4 et F6).

Pour les sources Cauvy et d'Ambressac, les conductivités électriques des eaux ont diminué suite à la recharge par les épisodes pluvieux du mois de mars. Les conductivités électriques à fin avril sont de l'ordre de 3 mS/cm, les valeurs demeurent très significativement supérieures à celles mesurées avant l'inversac (2 mS/cm et 0.8 mS/cm, respectivement).

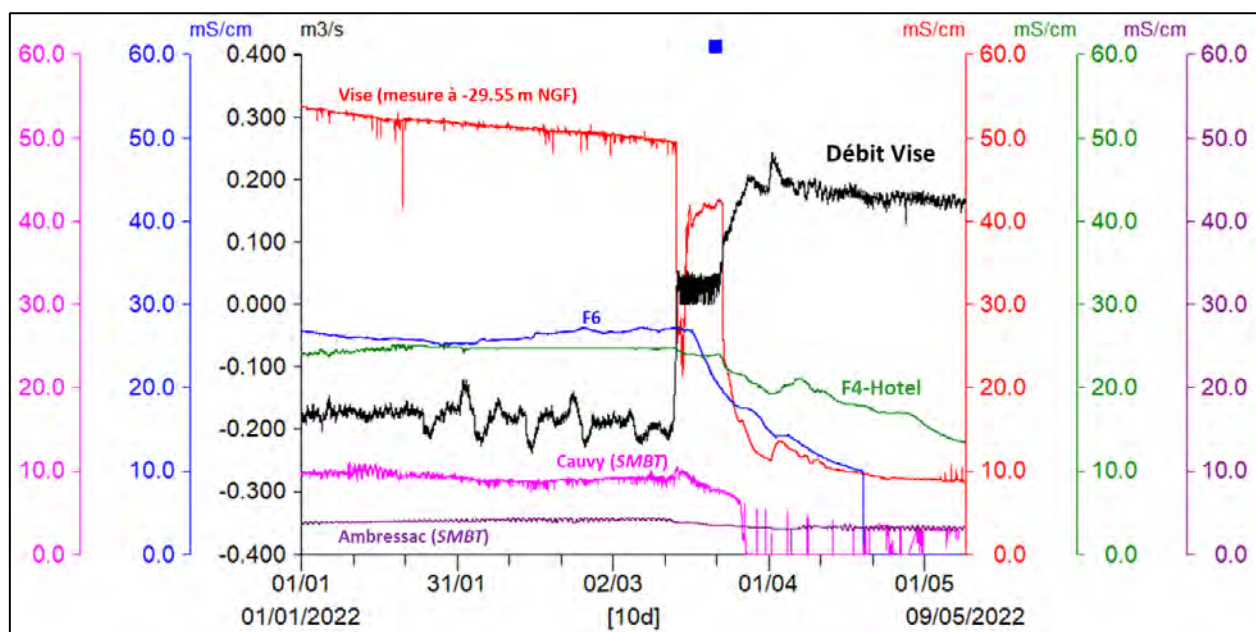


Illustration 49 : Évolution de la conductivité électrique des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc.

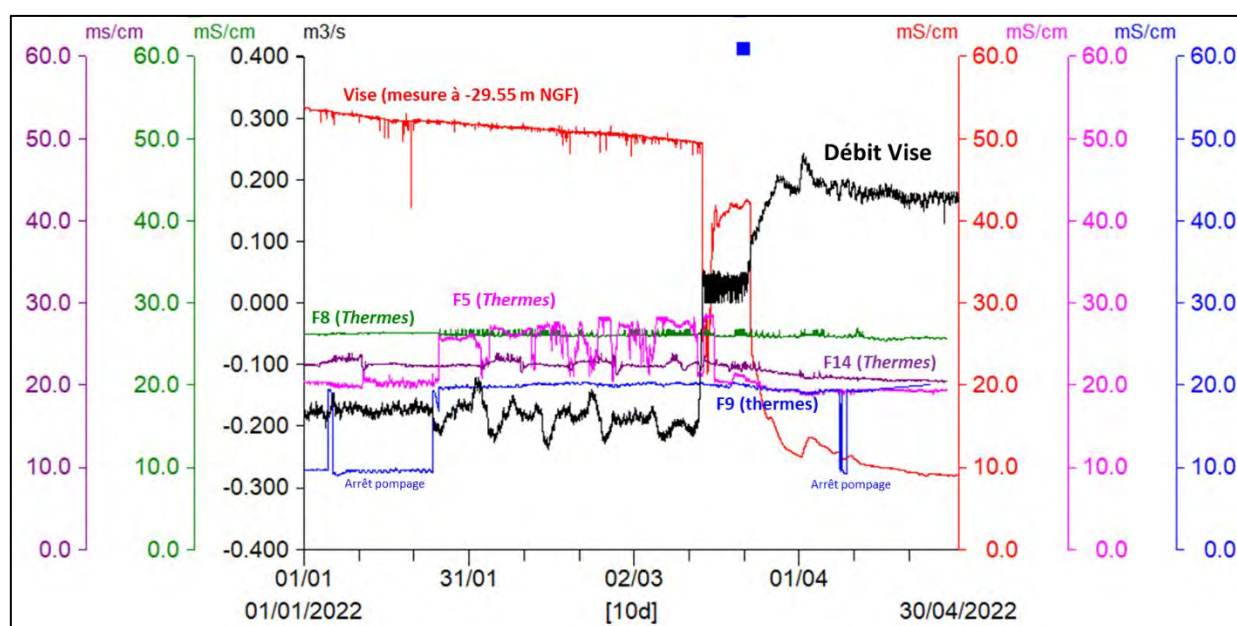


Illustration 50 : Évolution de la conductivité électrique des eaux (focus sur les forages des thermes)

Pour les eaux thermales, aucune évolution significative de la conductivité électrique n'est observée pour le forage F8.

Pour le forage F9, le phénomène d'inversac s'est traduit par une légère augmentation de la conductivité (de 18.6 mS/cm à 20.2 mS/cm), depuis la fin de l'inversac, une légère diminution a été observée (de 20.2 mS/cm à 19.3 mS/cm), les valeurs demeurent significativement supérieures à celles mesurées avant l'inversac (18.6 mS/cm).

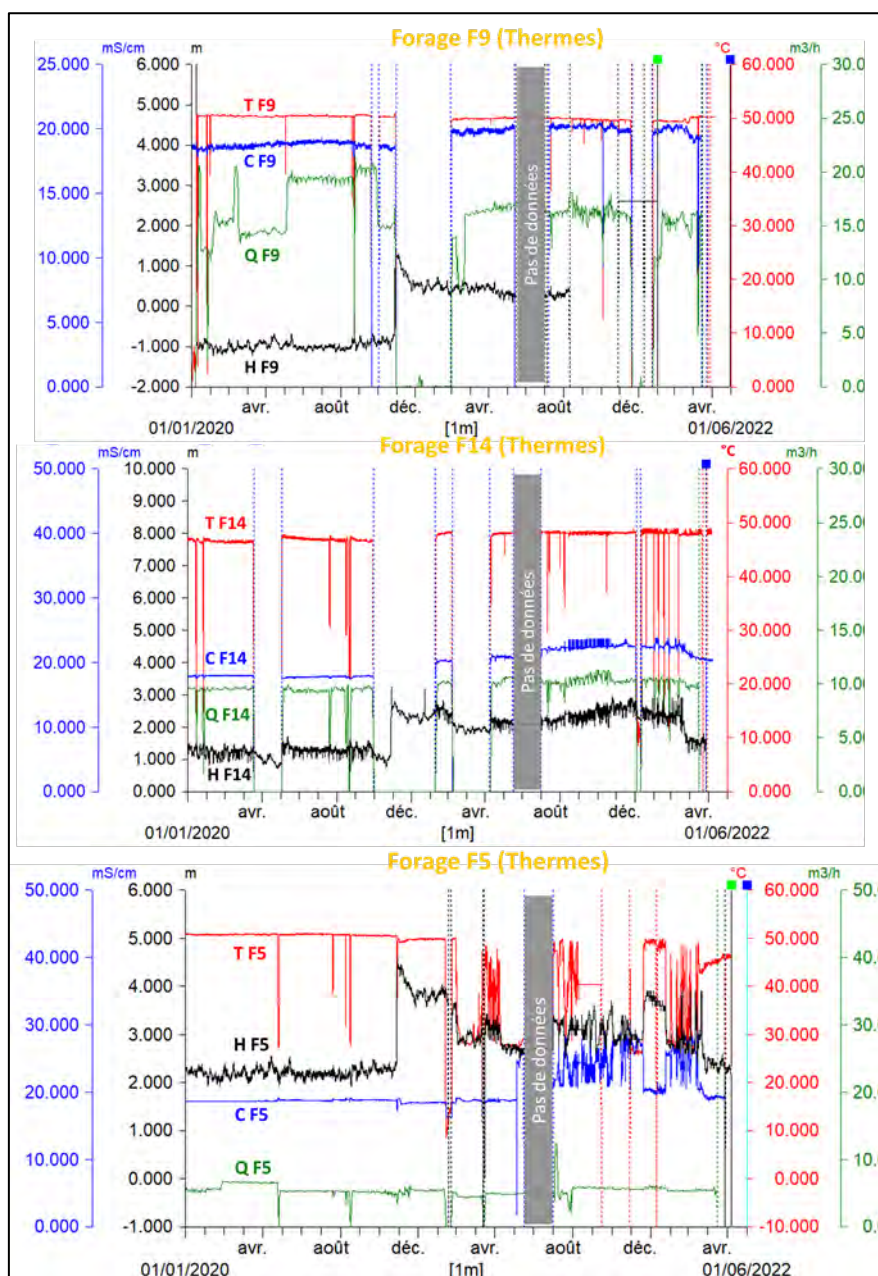


Illustration 51 : Évolutions de la hauteur d'eau, du débit de pompage et de la température et conductivité électrique des eaux pompées aux forages F9, F14 et F5 des thermes

Pour le forage F14, le phénomène d'inversac s'est également traduit par une augmentation de la conductivité (de 18 mS/cm à 22.5 mS/cm avec des pics ponctuels à 23 mS/cm). Depuis la fin de l'inversac, une diminution a été observée (de 22.5 mS/cm à 20.4 mS/cm), les valeurs demeurent significativement supérieures à celles mesurées avant l'inversac (18 mS/cm).

Pour le forage F5, le phénomène d'inversac s'est traduit par une importante augmentation et fluctuation de la conductivité (de 18.8 mS/cm jusqu'à 29 mS/cm lors des pics ponctuels). Depuis la fin de l'inversac, les fluctuations semblent avoir cessé et une diminution a été observée, les valeurs à fin avril (19.3 mS/cm) demeurent significativement supérieures à celles mesurées avant l'inversac (18.8 mS/cm).

5.1.3. Évolution de la température des eaux au sein de la presqu'île de Balaruc après l'arrêt du phénomène (Inversac 2020-2022)

Les évolutions de la température des eaux de la presqu'île de Balaruc sont présentées (Illustration 51 et Illustration 52).

Les mêmes deux phases d'évolutions sont distinguées. La première concerne la période du 14 mars 2022 au 22 mars 2022, la seconde concerne la période postérieure au 22 mars 2022.

Au cours de la première période, la température de la Vise augmente lors de la phase de diminution de la conductivité électrique, puis diminue pour se stabiliser autour de 25 °C. La réponse observée suggère la mobilisation dans un premier temps d'une eau à caractère thermique puis dans un second temps une eau saumâtre qui présente une conductivité électrique nettement plus élevée que celles mesurées aux ouvrages F4 et F6 (autour de 25 mS/cm et 27 mS/cm, respectivement) ou dans les ouvrages thermaux et une température comparable à celles mesurées dans le forage F5 à certaines périodes au cours de l'inversac (Illustration 52). Au cours de la première période, la température de l'eau dans l'ouvrage F4 est restée stable (23.7 °C) contrairement aux eaux du forage F6 pour lesquelles on observe l'amorce d'une légère diminution (20 °C à 18.9 °C).

Lors de la seconde période (après le 22 mars 2022), la température de la Vise amorce alors une chute importante (de 25 °C à 18 °C), les valeurs tendent à se stabiliser autour de 18.9 °C depuis la fin du mois d'avril. Les températures de l'ouvrage F4 sont restées globalement stables autour de 23.8 °C (± 0.1 °C), les eaux demeurent nettement plus chaudes que celles de la Vise et du F6 (19 °C), ces dernières présentent une température identique depuis le 10 avril.

Pour les eaux thermales, aucune évolution significative de la température (37.2 °C) n'est observée pour le forage F8 (non présenté).

Pour le forage F9, le phénomène d'inversac (cf. Illustration 51) s'est traduit par une légère diminution de la température des eaux thermales au cours du phénomène (valeur autour de 49.4 °C la veille de la fin de l'inversac contre 50 °C habituellement). La fin de l'inversac s'est traduit par une très faible évolution de la température (gamme comprise entre 49.1 et 49.9 °C). Depuis fin mars, la température est stable à 50.1 °C.

Pour le forage F14, la fin du phénomène d'inversac ne s'est pas traduit par d'importante variation de la température de l'eau (autour de 48° ± 0.3 °C).

Pour le forage F5, le phénomène d'inversac s'est traduit par d'importantes fluctuations de la température (entre 50 °C et 25 °C, Illustration 51), les baisses de température étant associées aux augmentations de la conductivité (de 18.8 mS/cm jusqu'à 29 mS/cm lors des pics ponctuels). Depuis la fin de l'inversac, les fluctuations de température semblent avoir cessé et une stabilisation autour de 50 °C est observée.

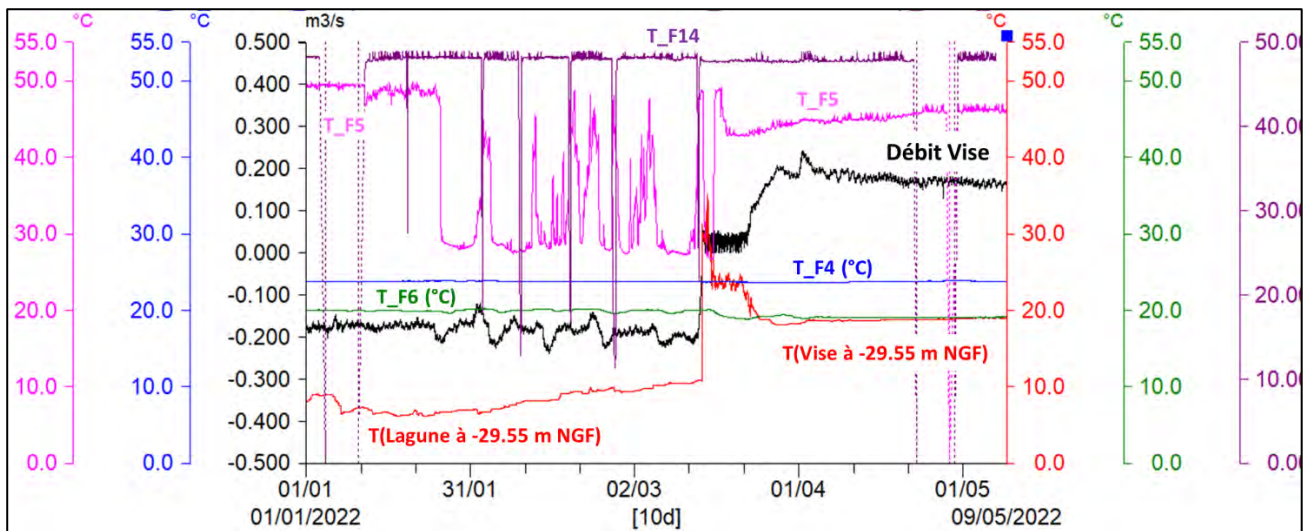


Illustration 52 : Évolutions de la température de l'eau des ouvrages F4, F5, F6 et F14. Les évolutions des débits et de la température de l'eau mesurée à la Vise (-29.5 m) sont également reportés.

5.1.4. Conclusion préliminaire

Le phénomène d'inversac 2020-2022 d'une durée de 471 jours a débuté le 28 novembre 2020 à 09h40 et s'est terminé le 14 mars 2022 à 08h35. Les évolutions mesurées au sein de la presqu'île de Balaruc depuis la fin du phénomène, au cours des 6 semaines qui ont suivi (jusqu'à fin avril 2022), ont été commentées dans ce rapport.

Les suivis réalisés à la Vise et au sein de la presqu'île de Balaruc au cours des 3 premières semaines après l'arrêt du phénomène d'inversac mettent en évidence un fonctionnement transitoire complexe de l'hydrosystème qui demande à être étudié dans le futur. Les évolutions mesurées depuis mi-avril apparaissent moins complexes, les débits de la Vise étant stabilisés autour de +150 L/s. L'étude de l'évolution des débits sur une plus longue période en lien avec l'évolution de la piézométrie dans le karst (P4-Balm) et la salinité de la lagune devra être menée dans le futur afin de vérifier si la solution analytique développée dans cette étude (cf. § 4.2.3) permet de décrire les évolutions mesurées. L'absence des données (à ce jour) sur la salinité de la lagune ne permet pas d'initier ces travaux. À la date du 30 avril, les flux exportés depuis la fin du phénomène sont les suivants : volume : 618 000 m³, masse de chlorure associé : 2 800 tonnes. Ces données sont à comparer au flux d'eau salé infiltré dans le karst (6.7 millions de m³ ± 0.3 millions de m³ ; masse de sel : 216 000 tonnes ± 11 000 tonnes). La quantité d'exportée par cette exutoire demeure à ce jour encore très faible par rapport aux quantités absorbées par le karst pendant l'épisode d'inversac 2020-2022.

Des évolutions complexes de la piézométrie sont également mises en évidence au sein de la presqu'île depuis la fin du phénomène. Globalement pour la presqu'île de Balaruc, une diminution plus ou moins rapide de la piézométrie de l'aquifère est observée, cette dernière avait fortement augmentée au cours de l'inversac (cf. § 3.5). Cette baisse piézométrique s'accompagne d'une chute de la minéralisation dans les ouvrages qui avait été fortement impactés par l'intrusion marine causé par l'inversac de la Vise. L'état physico-chimique de l'eau de ces ouvrages demeurent toujours très différents et supérieurs aux valeurs mesurées avant inversac.

L'ouvrage F5 d'observation des eaux thermales, pour lequel les suivis ont révélé que les eaux pompées sont fortement influencées par le phénomène d'inversac, présente de nouveau des caractéristiques plus stables de type thermal. La fin de l'inversac n'a pas provoqué d'évolution importante de la qualité physico-chimique des ouvrages F9 et F14. Les valeurs de conductivité électrique demeurent encore légèrement supérieures à celles mesurées avant l'inversac, les températures sont comparables à celles observées avant l'inversac.

6. Surveillance et gestion de l'inversac

Le suivi de l'inversac de 2020-2022 a mis en évidence l'entrée dans l'aquifère du Jurassique de volumes d'eau saumâtre très élevés, de l'ordre de 6.7 Mm³ sur la durée de l'inversac (471 jours). Ces volumes correspondent à 216 milliers de tonnes de sel dont seule une faible partie est ressortie de l'aquifère par la source de Cauvy (0.9 % soit 1 900 tonnes environ). La répétition du phénomène induit dès lors une salinisation progressive et difficilement réversible de l'aquifère. Il convient donc de mettre en place des moyens pour l'empêcher de se reproduire dans le futur.

Nous distinguons dans la suite (i) des actions de surveillance pour mieux anticiper le phénomène (§6.1), (ii) l'analyse de l'impact de l'augmentation du niveau de la mer (lagune) sur le phénomène (§6.2) et (iii) des mesures destinées à lutter contre la survenue du phénomène (§6.3).

6.1. SURVEILLANCE ET DÉFINITION D'INDICATEURS D'ALERTE

Pour gérer au mieux la ressource en eau souterraine sur le secteur de Thau, il convient de définir des indicateurs d'alerte et de prévision pour le risque d'inversac.

Nous distinguons deux indicateurs majeurs : (i) en situation normale (écoulements ascendants de l'aquifère vers l'étang), un indicateur de risque d'inversac et (ii) en situation d'inversac (écoulements descendants de l'étang vers l'aquifère), un indicateur de probabilité de fin de l'inversac.

6.1.1. Situation normale : indicateur de risque d'inversac

En hypothèse hydrostatique, les écoulements au travers du conduit karstique de la Vise restent ascendants tant que la charge hydraulique au sein de l'aquifère est supérieure à la charge de l'étang, corrigées des effets densitaires. L'indicateur suivant est proposé :

$$I_1 = H_p - \rho_e / \rho_o H_e > 0 \quad \text{Équation 11}$$

Tant que l'indicateur I_1 reste significativement positif (valeur seuil >0.8), le risque d'inversac est faible. Lorsqu'il se rapproche de zéro, le risque d'inversac augmente. Lorsque l'indicateur devient négatif, l'inversac se met en place.

Cet indicateur permet de prendre en compte les principaux mécanismes de démarrage des inversacs historiques :

- un niveau piézométrique bas au sein de l'aquifère lié à un pompage au sein de l'aquifère du Jurassique (1967), à des modifications au niveau du captage ancien de la source de la Vise (1984 et 1993) ou à des conditions climatiques de pluviométrie déficitaire saisonnières induisant une baisse de la recharge naturelle de l'aquifère (inversacs de 2014 et 2020) ;
- un niveau haut de l'étang de Thau lié à un épisode climatique ponctuel (inversacs de 2008 et 2010) ;
- par ailleurs, on constate qu'en théorie, une augmentation de la salinité de l'étang (liée aux phénomènes d'évapotranspiration pendant une période sèche) ou une modification de la densité de l'eau de l'aquifère (liée à des modifications des contributions des différentes composantes de mélange) peuvent aussi contribuer à enclencher le mécanisme d'inversac.

L'indicateur I_1 est constitué des quatre variables suivantes :

- H_p correspond à une mesure de la charge hydraulique au sein de l'aquifère Jurassique¹² représentative de l'état de l'aquifère à sa limite amont (non perturbée par les pertes de charge et pompage au sein de l'aquifère dans la presqu'île de Balaruc) ;
- ρ_o correspond à la densité de l'eau de l'aquifère au droit du piézomètre d'observation choisi pour mesurer la variable précédente H_p ;
- ρ_e correspond à la densité de l'eau saumâtre de la lagune dans le secteur de la Vise ;
- H_e correspond à la hauteur d'eau dans la lagune de Thau dans le secteur de la Vise¹.

Lors de l'inversac de 2020, différentes chroniques piézométriques ont été utilisées pour tester l'indicateur I_1 (§ 4.2.3). Il apparaît que la chronique piézométrique qui semble le mieux représenter l'état de l'aquifère à une certaine distance et dont la prise en compte dans l'indicateur induit une valeur proche de zéro lors de l'inversac est la chronique mesurée au forage P4 La-Balme. La chronique d'évolution de l'indicateur montre une valeur qui devient négative au moment de l'inversac de 2020 (Illustration 53). L'indicateur I_1 constitué avec la chronique mesurée à P4 La Balme pour la variable H_p semble donc être un bon indicateur de risque de déclenchement d'inversac dans les conditions de 2020.

¹² Cette charge est mesurée par rapport à un niveau de référence choisi tel que $z = 0$ au griffon de la source de la Vise

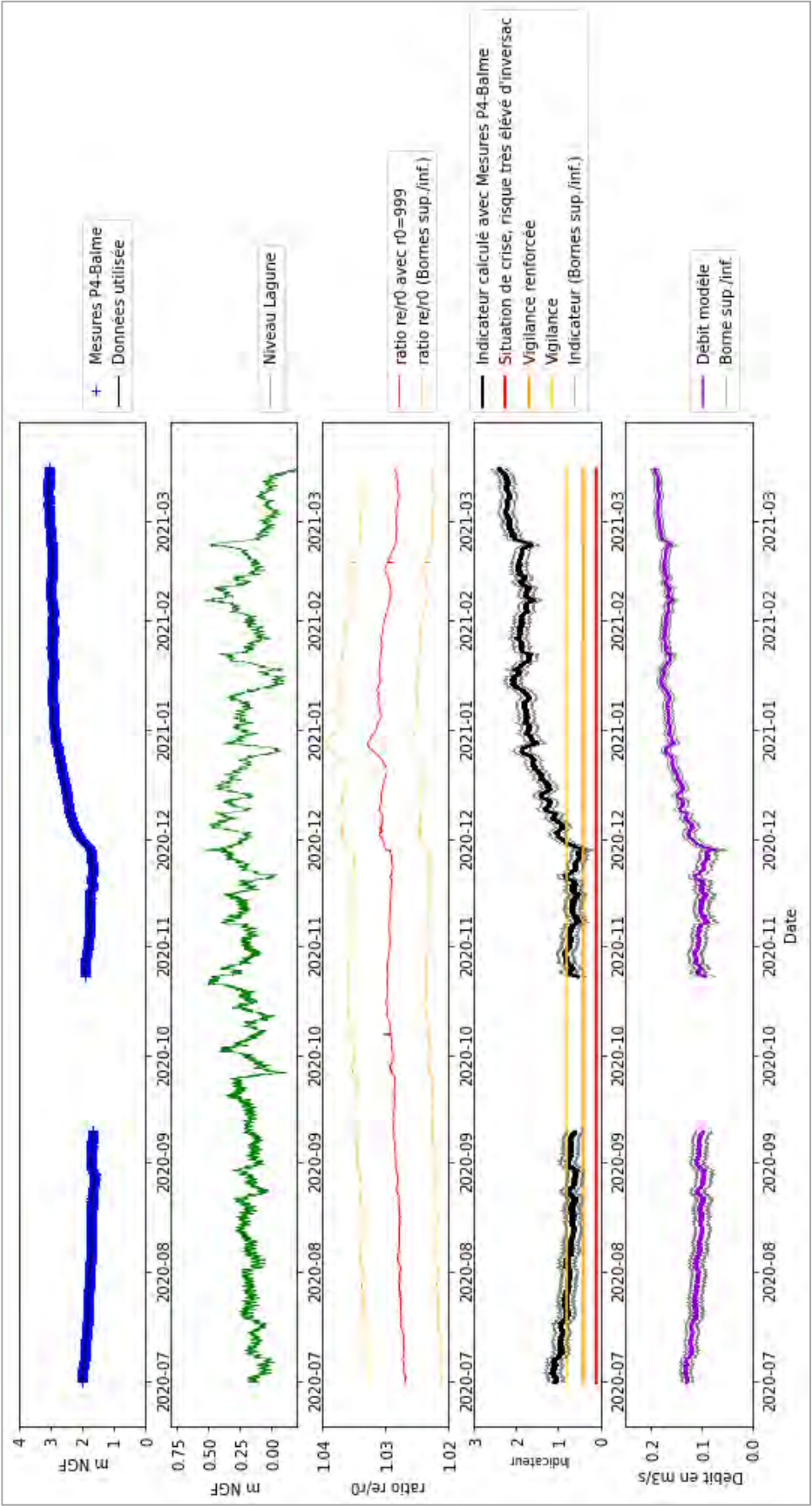


Illustration 53 : Inversac 2020 : évolution piézométrique (P4 La Balme) et de la cote de la lagune ainsi que du rapport re/ro estimé. Évolutions de l'indicateur I_1 calculé avec H_p à P4 La Balme (période de juillet 2020 à mars 2021)

En novembre 2020, le contexte hydrologique de basses eaux ($H_p = 1.7$ m NGF) et le contexte de haut niveau de la lagune ($H_e = 0.58$ m NGF) plaçaient le système hydrogéologique dans un contexte de crise vis-à-vis du déclenchement de l'inversac (Illustration 54).

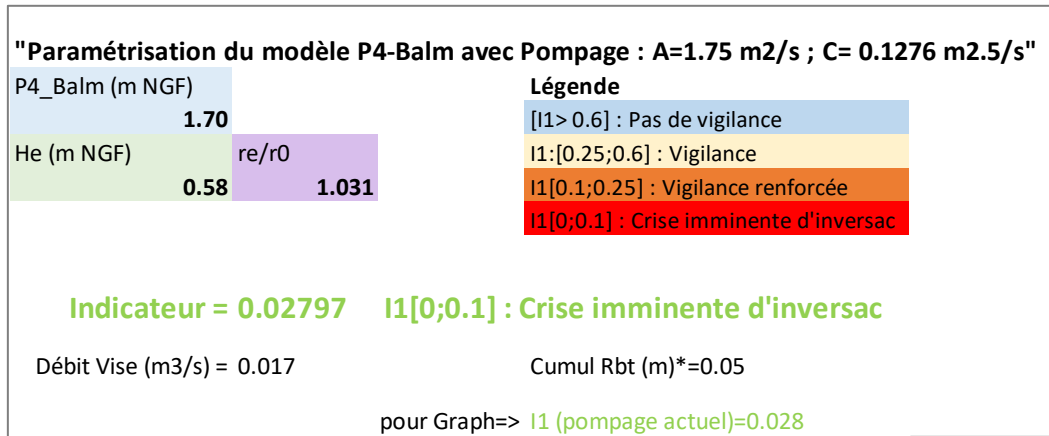


Illustration 54 : Proposition des seuils de vigilance en fonction de la valeur de l'indicateur. Situation du système hydrogéologique juste avant l'inversac du 28/11/2020

Une petite variation temporaire de + 0.05 m du niveau de la lagune a potentiellement suffi pour déclencher l'inversac (Illustration 55).

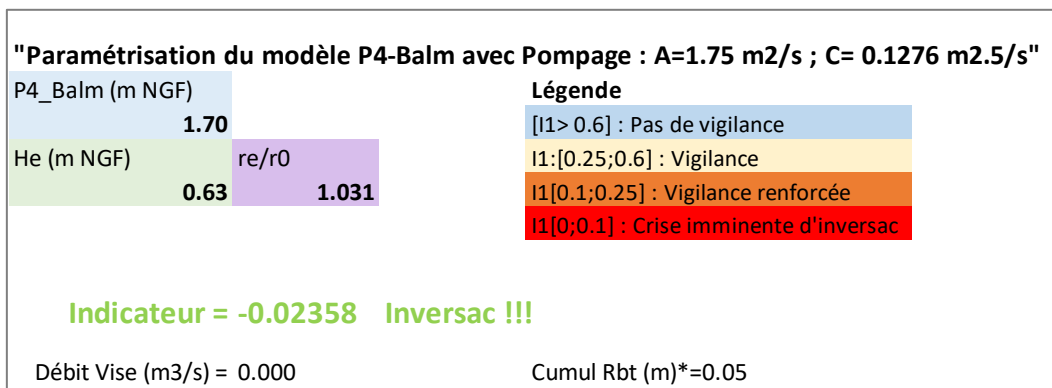


Illustration 55 : Paramètres lors du déclenchement de l'inversac de 2020

Selon la configuration hydrogéologique, l'indicateur I_1 permet de qualifier l'état du système vis-à-vis du risque d'inversac. Dans l'exemple (Illustration 56) construit sur la base des résultats de la modélisation (cf. 4.2.3), on peut constater, pour une valeur de ratio fixé ($\rho^e/\rho_o = 1.031$) et lorsque le niveau piézométrique dans le karst est faible ($H_p = 1.7$ m NGF), que le risque de déclenchement de l'inversac augmente fortement lorsque le niveau de la lagune devient supérieur à 0.5 m NGF. Dans un contexte de haut niveau de la lagune ($H_e = 0.58$ m NGF), le risque de déclenchement de l'inversac diminue lorsque la piézométrie H_p dans le karst augmente ([B]). La connaissance des valeurs des trois variables (H_p , H_e et ρ^e/ρ_o) constitue le préalable à la caractérisation de l'indicateur I_1 .

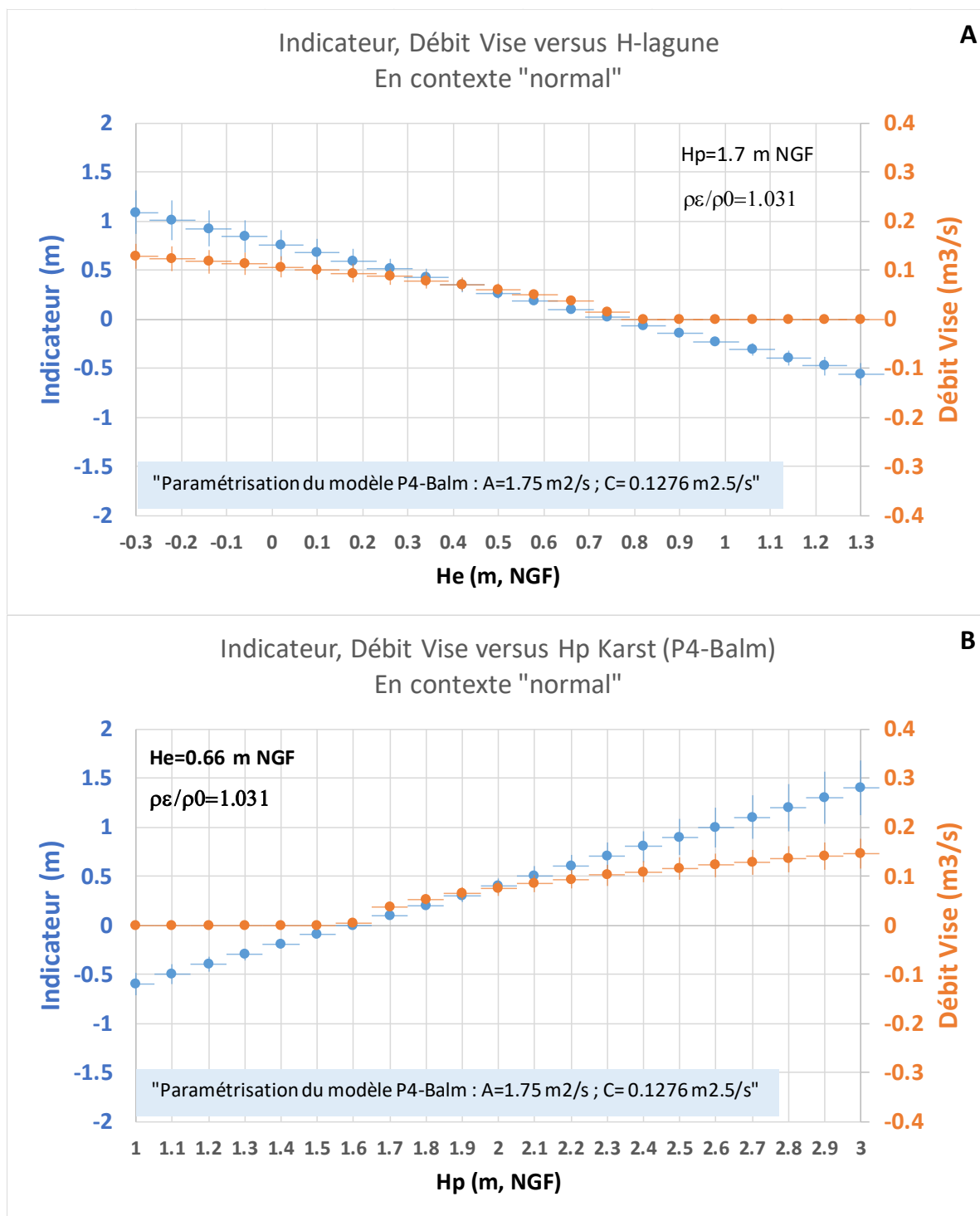


Illustration 56 : Évolutions de l'indicateur et du débit modélisé de la Vise (en contexte de fonctionnement « normal ») pour différentes configurations hydrogéologiques. [A] évolutions en fonction de la cote de la lagune de Thau pour une valeur donnée de H_p et ρ_e/ρ_o . [B] évolutions en fonction de la charge piézométrique H_p pour une valeur donnée de H_e et ρ_e/ρ_o .

Nous avons tenté d'évaluer l'indicateur I_1 au cours des précédents inversacs de façon à vérifier sa pertinence dans sa représentation des phénomènes à l'origine du déclenchement d'un inversac. Cependant, cette analyse s'est heurtée à l'indisponibilité de chroniques de mesures pour certaines des variables concernées (H_e et ρ_e/ρ_o notamment). Le tableau suivant (Illustration 57) décrit la disponibilité de mesures pour les différents inversacs depuis 2008. Il montre qu'hormis en 2020, grâce au projet DEM'EAUX Thau, il existe peu de données disponibles pour vérifier/valider l'indicateur I_1 de déclenchement d'inversac. Toutefois, sur la base des chroniques reconstituées pour les variables H_e et ρ_e/ρ_o l'indicateur I_1 a été évalué, les résultats sont présentés sur la figure suivante (Illustration 62) et dans le tableau ci-après (Illustration 57).

Pour les inversacs de 2008 et 2014, l'indicateur I_1 calculé est proche de 0.1 dans les jours qui précèdent la survenue des inversacs ce qui signifie que le risque d'inversac était très élevé à ces périodes. Pour 2010, la valeur de l'indicateur calculé apparaît supérieure au seuil de vigilance ce qui amène à s'interroger sur la fiabilité des variables d'entrée du modèle (H_e , H_p et ρ_e/ρ_o). Fin 2017, début 2018 l'indicateur I_1 présentait des valeurs très faibles (Illustration 62), le risque d'inversac était donc très important. Les précipitations importantes du mois de janvier 2018 (cumul de l'ordre de 180 mm sur le secteur d'étude) ont permis une recharge importante du karst ce qui a permis d'augmenter très significativement l'indicateur $I_1 > 1$ et donc stopper la situation de crise. L'indicateur apparaît très satisfaisant pour décrire les phénomènes.

Variable	Inversac 2020	Inversac 2014	Inversac 2010	Inversac 2008
H_p (P4 Balme)	Chroniques disponibles H_p (m NGF) = 1.70	Chroniques disponibles H_p (m NGF) = 1.28	Chroniques disponibles H_p (m NGF) = 2.03	Chroniques disponibles H_p (m NGF) = 1.325
ρ_o (kg/m3)	$\rho_o = 999$	$\rho_o = 999$	$\rho_o = 999$	$\rho_o = 999$
ρ_e (kg/m3)	Donnée ponctuelle à la Vise à l'inversac (Estimation à partir de la conductivité) $\rho_e = 1031.7$ $\rho_e = 1028.3$ (Station 104-P-001 IFREMER) (+/-0.2%)	Données externes (Estimation à partir de la salinité de la Station 104-P-001 IFREMER) $\rho_e = 1026.4$ (+/-0.2%)	Données externes (Estimation à partir de la salinité de la Station 104-P-001 IFREMER) $\rho_e = 1028.9$ (+/-0.2%)	Données externes (Estimation à partir de la salinité de la Station 104-P-001 IFREMER) $\rho_e = 1029.7$ (+/-0.2%)
H_e	Chronique disponible H_e (m NGF) = 0.58, pic à 0.63	Chronique disponible H_e (m NGF) = 0.08	Chronique reconstituée H_e (m NGF) = 0.33	Chronique reconstituée H_e (m NGF) = 0.37

Illustration 57 : Tableau des données disponibles pour les variables de l'indicateur I_1 lors des inversacs récents (code couleur selon la disponibilité et qualité des données)

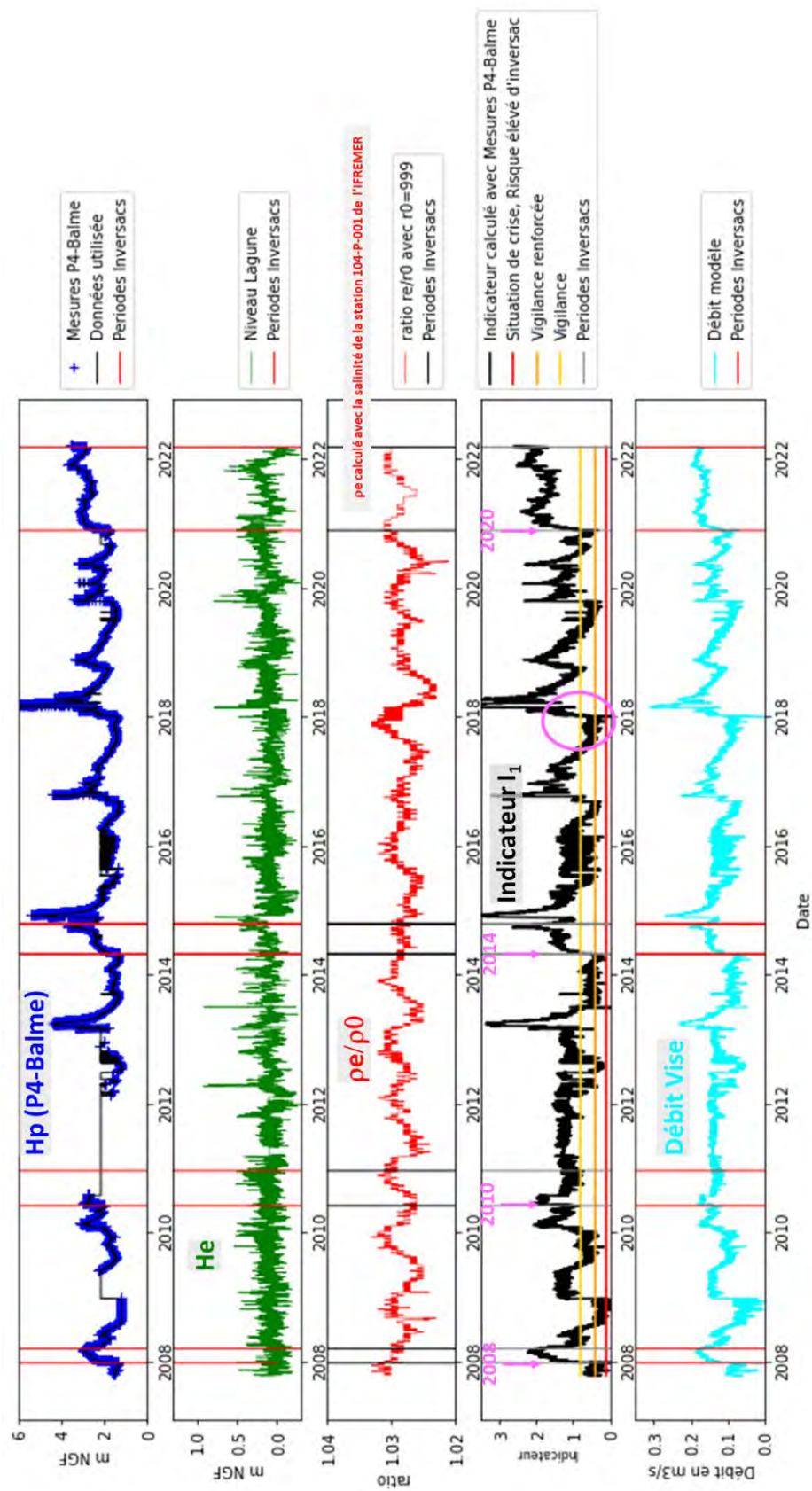


Illustration 58 : Évolution de l'indicateur I_1 et des débits de la Vise calculés à l'aide des variables H_P , H_e et ρ_e/ρ_o .

La figure suivante (Illustration 59) présente l'évolution du débit de la Vise en fonction de la valeur de l'indicateur I_1 , variable calculée à l'aide des variables H_e , H_p et ρ_e/ρ_o , les débits de la Vise étant calculés à l'aide de l'équation 3. Un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I_1 a été élaboré. Selon la valeur de l'indicateur I_1 , 4 situations distinctes ont été distinguées :

- $I_1 > 0.8$: Pas de vigilance ;
- $0.25 < I_1 < 0.8$: Vigilance ;
- $0.1 < I_1 < 0.25$: Vigilance renforcée ;
- $I_1 < 0.1$: Crise imminente d'inversac.

L'outil permet sur la base des gammes possibles des variables explicatives (H_e , H_p et ρ_e/ρ_o) d'évaluer instantanément la valeur du paramètre I_1 et la valeur du débit de la Vise et de connaître le contexte de vigilance associé.

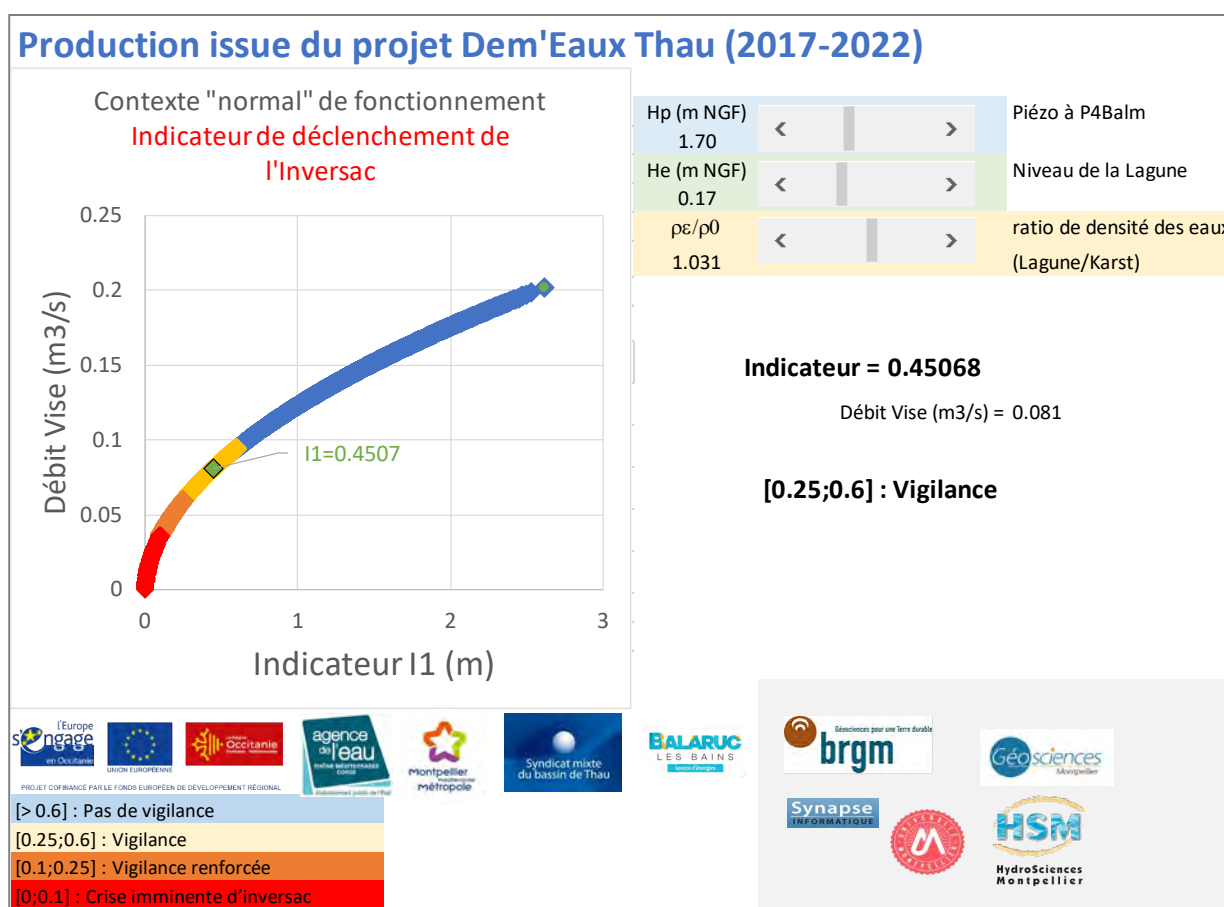


Illustration 59 : Présentation du prototype de l'outil (V0) permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I_1 . (exemple de situation en fin d'été estival)

Un second prototype (V0bis) a été développé pour évaluer l'effet des pompages (Illustration 60, cf. § 4.2.3). L'esprit adopté ici pour ce prototype est de permettre à l'utilisateur d'évaluer, pour une situation hydrogéologique donnée (H_{pz} , H_e et ρ_e/ρ_o), l'effet d'une modification du régime de pompage (ouvrages F5, F6, F9, F14...) sur l'indicateur/débit de la Vise. En effet, les pompages dans le voisinage de la Vise (distance inférieure à 900 m) provoquent un rabattement de quelques centimètres voire une dizaine de centimètres de la piézométrie au droit de la Vise.

Les deux valeurs de l'indicateur/débit de la Vise sont replacées dans le contexte de vigilance précédemment défini.

Production issue du projet Dem'Eaux Thau (2017-2022)

Un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac de la Vise à l'aide de l'indicateur I_1 a été élaboré dans le cadre du projet Dem'Eaux Thau (BRGM/RP-70839-FR). L'outil permet sur la base des gammes possibles des variables explicatives (He, Hp et re/ro) d'évaluer instantanément la valeur du paramètre I_1 et la valeur du débit de la Vise et ainsi de connaître le contexte de vigilance associé.

Selon la valeur de l'indicateur I_1 , 4 situations distinctes ont été distinguées :

- $I_1 > 0.8$: Pas de vigilances [$Q_{vise} > 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$]
- $0.25 < I_1 < 0.8$: Vigilance [$0.062 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{vise} < 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$]
- $0.1 < I_1 < 0.25$: Vigilance renforcée [$0.039 \text{ m}^3/\text{s} < Q_{vise} < 0.062 \text{ m}^3/\text{s}$]
- $I_1 < 0.1$: Crise imminente d'inversac [$Q_{vise} < 0.039 \text{ m}^3/\text{s}$]

Ce prototype permet également la prise en compte de l'effet des pompages sur des ouvrages situés à proximité de la Vise (F5, F6, F9 et F14...).

L'esprit adopté ici pour ce prototype est de permettre à l'utilisateur d'évaluer, pour une situation hydrogéologique donnée (Hpz, He et re/ro), l'effet d'une modification du régime de pompage (ouvrages F5, F6, F9, F14...) sur l'indicateur/débit de la Vise. Les 2 valeurs de l'indicateur/débit de la Vise sont replacés dans le contexte de vigilance précédemment définie



Illustration 60 : Présentation du prototype de l'outil (V0bis) permettant d'évaluer le risque de déclenchement de l'inversac à l'aide de l'indicateur I_1 en tenant compte de l'effet des pompages. Dans l'exemple, le critère « actuel » représentait la situation de l'hydrosystème dans les heures qui précédaient l'inversac.

6.1.2. Situation d'inversac : indicateur de situation d'arrêt d'inversac

En hypothèse hydrostatique, les écoulements au travers du conduit karstique de la Vise restent descendants tant que la charge hydraulique au sein de l'aquifère est inférieure à la charge de l'étang, corrigée des effets densitaires et du surplus de charge hydraulique lié au remplissage du conduit karstique de la Vise durant l'inversac sur une hauteur P . L'indicateur suivant est proposé :

$$I_2 = \rho_e / \rho_o (H_e + P) - P - H_p > 0$$

Tant que l'indicateur I_2 reste significativement positif (> 0.1), l'inversac sera durable. Lorsqu'il se rapproche de zéro (< 0.1), la probabilité de fin d'inversac augmente. Lorsque l'indicateur devient négatif, l'inversac s'arrête.

La chronique d'évolution de l'indicateur I_2 au cours de l'inversac 2020-2022 est présentée ci-après (Illustration 61) ainsi que l'évolution des variables H_p , H_e et ρ_e / ρ_o et du débit de la Vise modélisé et mesuré. Tant que l'indicateur est supérieur à 0.1, le phénomène d'inversac se poursuit. La fin du phénomène 2020-2022 s'est produit lors de l'épisode du 14/03/2022 lorsque le ratio ρ_e / ρ_o au droit de la Vise a baissé autour d'une valeur de 1.022, probablement suite aux apports des eaux de surface à la lagune (dont la Vène est le contributeur majeur, pic de crue $> 10 \text{ m}^3/\text{s}$). Il est intéressant de noter qu'en novembre 2021, lors des épisodes pluvieux, la charge piézométrique dans le karst a été comparable à celle mesurée le 14 mars 2022 mais que le phénomène d'inversac ne s'est pas terminé ($I_2 = 1$) car la salinité de la lagune était encore importante (ration $\rho_e / \rho_o > 1.03$) suite au phénomène d'évaporation estivale.

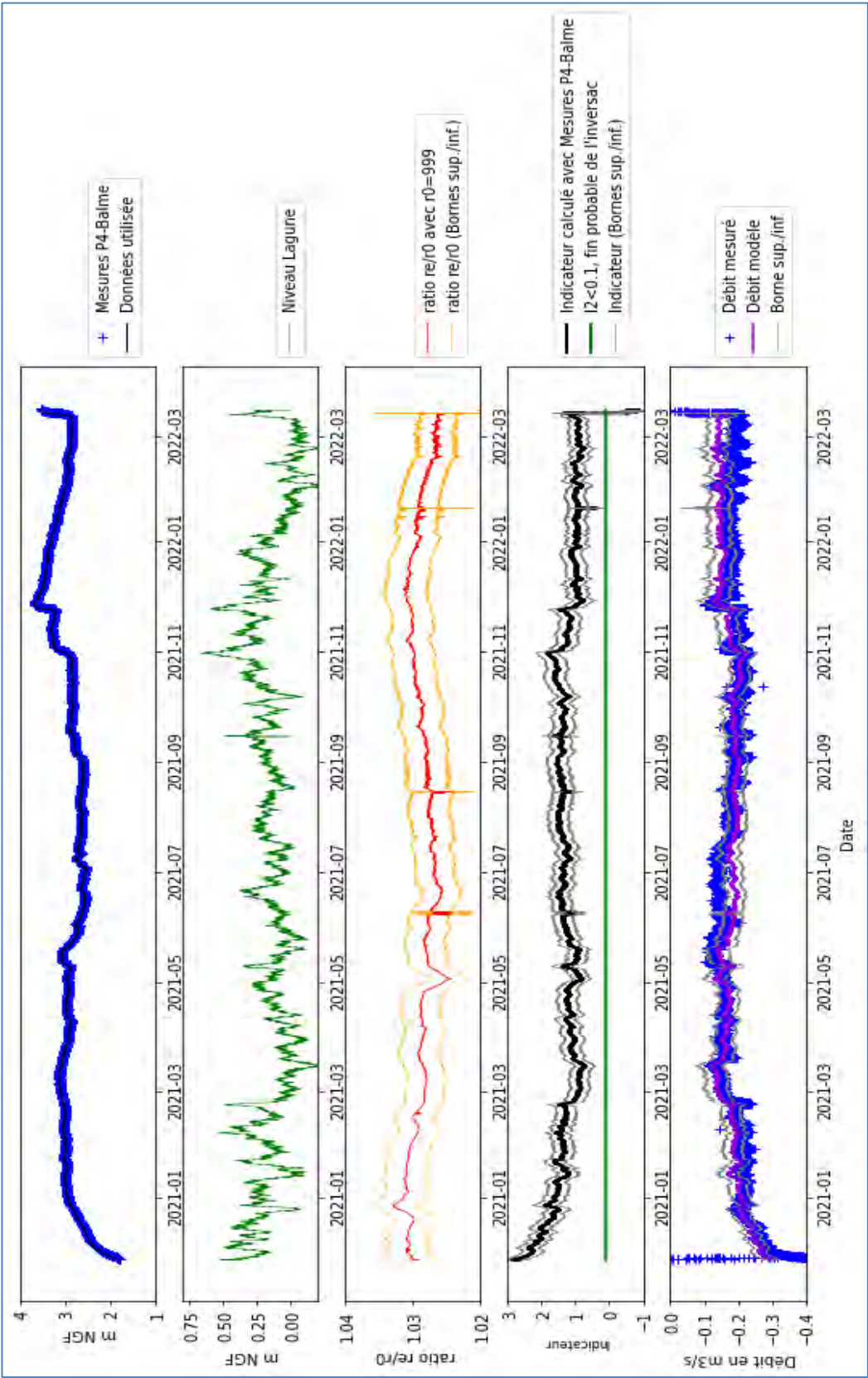


Illustration 61 : Évolution de l'indicateur I_2 et des débits de la Vise calculés à l'aide des variables H_P , H_e et ρ_e/ρ_o .

Nota. Les bornes sup. et inf. de ρ_e/ρ_o sont définies à partir de l'incertitude sur la mesure de la salinité

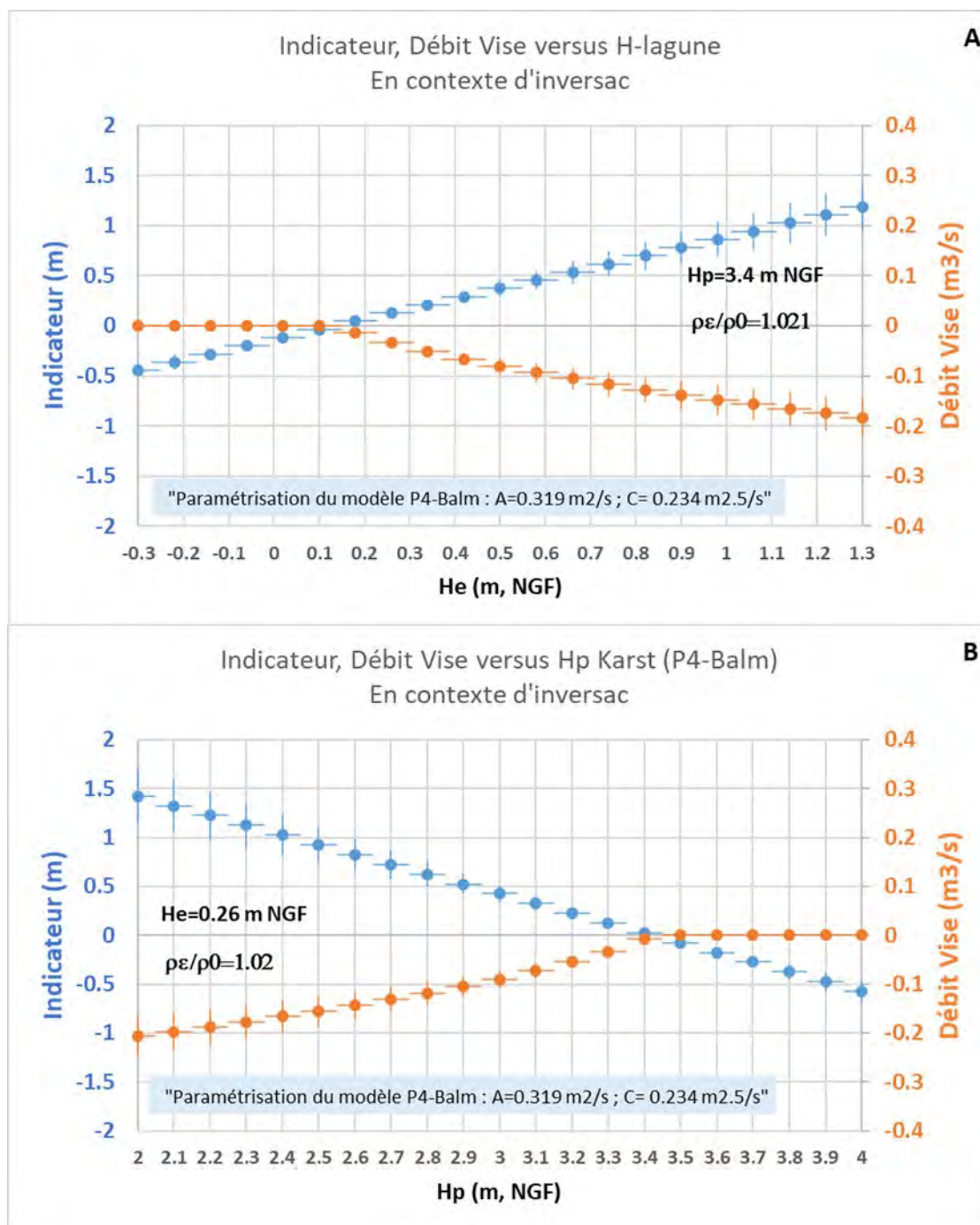


Illustration 62 : Évolutions de l'indicateur et du débit modélisé de la Vise (en contexte d'inversac) pour différentes configurations hydrogéologiques. [A] évolutions en fonction de la cote de la lagune de Thau pour une valeur donnée de H_p et ρ_e/ρ_0 . [B] évolutions en fonction de la charge piézométrique H_p pour une valeur donnée de H_e et r_e/r_0 .

Selon la configuration hydrogéologique, l'indicateur I2 permet de qualifier l'état du système vis-à-vis de la possibilité de fin d'inversac.

Dans l'exemple (Illustration 62) construit sur la base des résultats de la modélisation (cf. 4.2.3), on peut constater (Illustration 62, A) que la possibilité de fin du phénomène d'inversac se rapproche lorsque le niveau de la lagune devient inférieur à 0.3 m NGF dans un contexte de haut niveau de l'aquifère ($H_p = 3.4$ m NGF) et de faible salinité de la lagune ($\rho_e/\rho_o = 1.021$). Dans un contexte de niveau de lagune moyen ($H_e = 0.26$ m NGF) et de faible salinité de la lagune ($\rho_e/\rho_o = 1.021$), la possibilité de fin du phénomène d'inversac se rapproche lorsque la piézométrie H_p dans le karst augmente au-dessus de 3.3 m NGF (Illustration 62, [B]). La connaissance des valeurs des trois variables (H_p , H_e et ρ_e/ρ_o) constitue le préalable à la caractérisation de l'indicateur I2.

De manière similaire, un prototype (V0) d'un outil permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac à l'aide de l'indicateur I2 a été élaboré. L'outil permet sur la base des gammes possibles des variables explicatives (H_e , H_p et ρ_e/ρ_o) d'évaluer instantanément la valeur du paramètre I2 et d'estimer la valeur du débit d'absorption des eaux saumâtres de la lagune par la Vise.

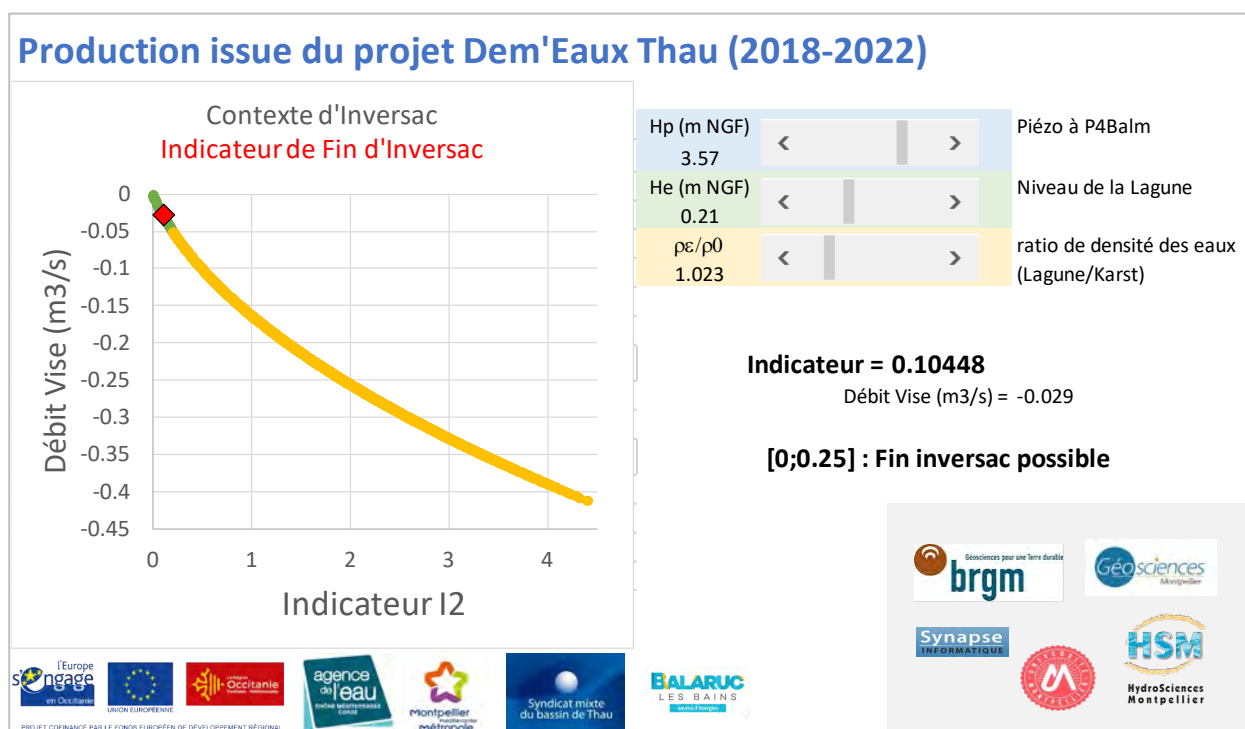


Illustration 63 : Présentation du prototype de l'outil (V0) permettant d'évaluer la possibilité de fin de l'inversac

6.1.3. Surveillance

Les indicateurs I1 et I2 nécessitent la connaissance de plusieurs variables (H_p , H_e , ρ_e/ρ_o) définies au § 6.1.1. Certaines d'entre elles sont encore mal connues (salinité de la lagune au niveau de la Vise) et nécessitent la mise en place d'une instrumentation supplémentaire. **Nous recommandons de mettre en place un système de mesures de la hauteur d'eau dans l'étang et de sa salinité dans un périmètre proche de la source de la Vise. Le pas de temps de mesure sera horaire.**

Nous recommandons également de maintenir le suivi piézométrique au sein du forage de P4 La Balme et également à l'ouvrage CGE-Tennis pour pallier une éventuelle défaillance du premier.

6.2. ANALYSE PROSPECTIVE DE L'EFFET D'UNE AUGMENTATION DU NIVEAU MOYEN DE LA LAGUNE SUR L'OCCURRENCE DU DÉCLENCHEMENT DU PHÉNOMÈNE D'INVERSAC

Dans le but d'évaluer l'influence du niveau de la lagune sur l'occurrence du déclenchement du phénomène d'inversac de la source de la Vise dans un contexte de changement climatique, un test préliminaire de sensibilité a été effectué dans cette étude. Les projections des scénarios climatiques indiquent que le niveau moyen de la Méditerranée et par conséquent celui de la lagune de Thau devrait augmenter dans les prochaines décennies. Le niveau moyen de la mer Méditerranée a augmenté de 6 cm au cours des 20 dernières années. L'élévation moyenne du niveau de la mer à l'échelle mondiale dans les années à venir reste aujourd'hui incertaine. Selon la méthode utilisée, les scénarios prévoient une élévation moyenne du niveau de la mer à l'échelle mondiale comprise entre 52 et 190 cm à l'horizon 2100. Ces incertitudes auront un impact important sur l'élévation du niveau de la mer Méditerranée en raison de sa connexion au système océanique mondial, via le détroit de Gibraltar.

Dans cette étude, nous avons considéré une augmentation de +0.2 m du niveau moyen de la lagune par rapport à la période d'observation actuelle (octobre 2007 - avril 2022). Pour le test, les autres variables du modèle (H_p , ρ_e/ρ_o , débit pompage) sont inchangées (identiques à ceux de la période 2007-2022) pour ce scénario de modélisation. Les résultats préliminaires (Illustration 64) laissent suggérer que les périodes de crises imminentes seraient plus fréquentes et plus longues dans ce scénario de conséquence lié au changement climatique. De manière plus quantitative, sur la période d'observation (octobre 2007-avril 2022), l'indicateur est passé sous le seuil de vigilance renforcée environ 6 % du temps. Dans un contexte d'augmentation de +0.2 m du niveau moyen de la lagune (autres variables du modèle inchangées), l'indicateur passerait sous le seuil de vigilance renforcée environ 12 % du temps.

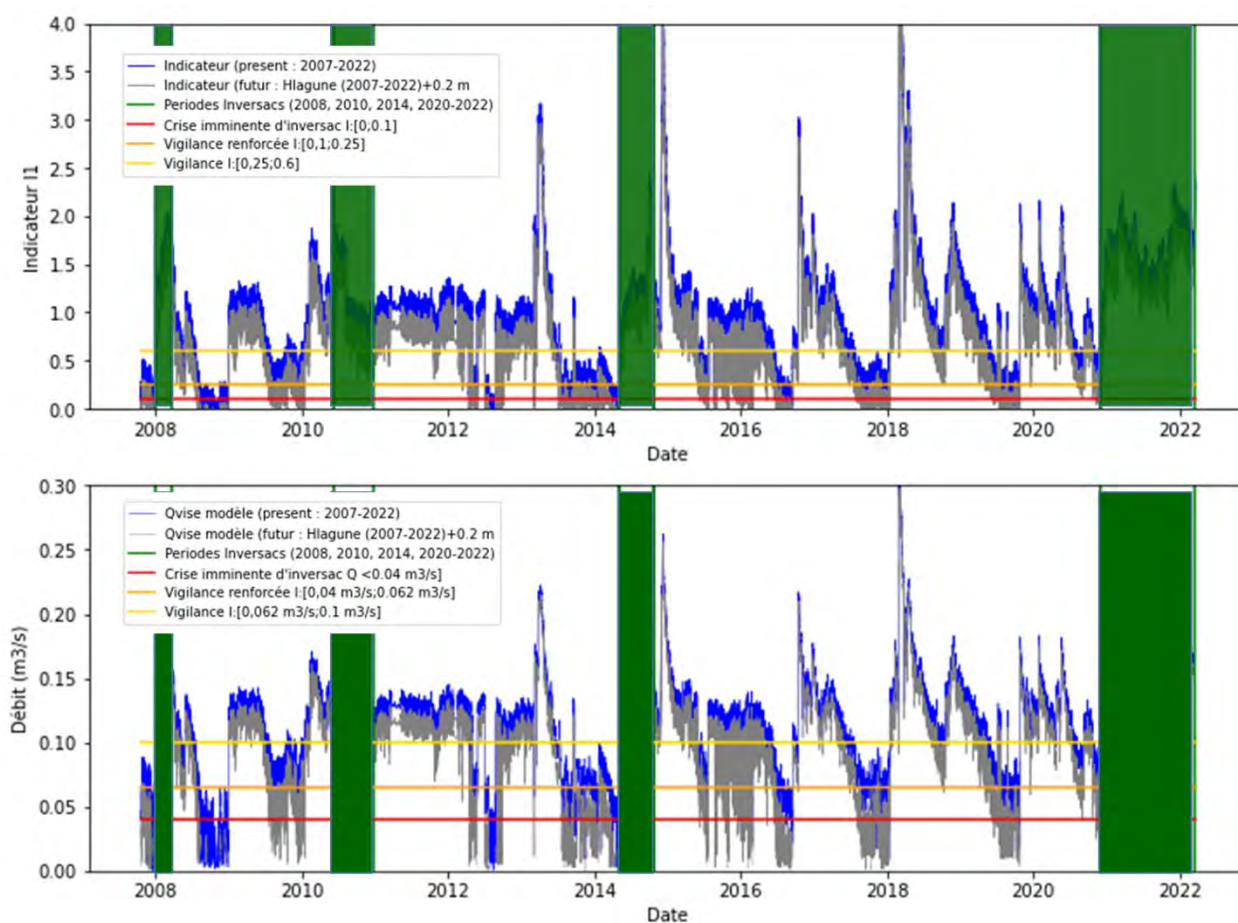


Illustration 64 : Simulation de l'évolution de l'indicateur et du débit de la Vise dans un contexte d'augmentation du niveau de la lagune (+0.2 m) par rapport à la situation actuelle (2007-2022)

6.3. REMÉDIATION

Dans cette section, nous explorons les différentes pistes de gestion de l'hydrosystème qui pourraient permettre de (i) réduire le risque de survenue d'un inversac et (ii) lutter contre un inversac une fois celui-ci mis en place.

Le mécanisme de mise en place de l'inversac identifié dans ce rapport (décrit au § 3.4) implique une forte non-linéarité du phénomène : une fois le conduit karstique vertical rempli d'eau salée par l'inversac, la hausse de charge hydraulique induite (de l'ordre de 2.3 m environ) par l'étang sur la source doit être compensée pour retrouver un état normal. Comme mis en évidence par la modélisation numérique du phénomène (§ 4.3.2), si une faible baisse de niveau d'eau dans l'aquifère peut provoquer un inversac, la hausse de niveau d'eau dans ce même aquifère, nécessaire pour stopper le phénomène d'inversac, est augmentée de cette surcharge hydraulique, soit 2.3 m environ.

Le retour à une situation normale après un inversac est donc beaucoup plus compliqué que sa mise en place. L'étude permet également de mettre en évidence l'importance du rôle joué par le contraste de masse volumique entre la lagune et l'eau du karst dans le déclenchement et l'arrêt du phénomène d'inversac. Ces constatations nous amènent à suggérer des **solutions de prévention de mise en place de l'inversac** pour avoir à éviter de lutter contre un inversac déjà en place.

6.3.1. Injection d'eau dans l'aquifère à proximité de la Vise

La recharge artificielle (ou maîtrisée) d'un aquifère est très régulièrement mise en œuvre dans les aquifères côtiers pour lutter contre le biseau salé en contribuant à augmenter le niveau piézométrique de la nappe aquifère et repousser ainsi l'intrusion saline. Les exemples à disposition dans la littérature concernent cependant généralement des cas classiques d'interfaces diffus entre eau de mer et eau souterraine au sein d'un milieu poreux. Le cas d'une intrusion localisée au travers d'un conduit karstique n'est généralement pas abordé.

À partir des essais de pompage réalisés sur la plateforme du forage profond et dans le secteur de Balaruc-les-Bains, nous proposons des simulations d'injection d'eau dans le drain karstique, ou dans les conduits karstiques en relation avec la source de la Vise (Illustration 65). Le but est d'apprécier s'il est possible de réduire l'effet d'un inversac ou empêcher qu'il se produise. Dans un premier temps, des modélisations ont été réalisées à partir des informations hydrodynamiques déduites au forage DGMT1, interceptant une zone de fracture/drain en connexion avec la source, et situé à environ 310 m de cette dernière, et dans un second temps à partir des propriétés moyennes de l'aquifère du Jurassique au niveau de Balaruc. Ces secondes modélisations permettront de mieux apprécier ce qu'il se passerait pour un forage localisé dans une situation moyenne de l'aquifère. L'ensemble des simulations concernent un ouvrage dans une situation comparable à celle de DGMT1 en terme de distance à la source de la Vise mais il ne s'agit pas forcément de ce dernier car il n'a pas été équipé pour réaliser de l'injection. L'objectif de ces simulations est de pouvoir juger si l'injection d'une certaine quantité d'eau est susceptible ou pas de faire suffisamment remonter le niveau piézométrique au niveau de la source afin d'éviter, ou diminuer l'effet d'un inversac. Ces simulations ne tiennent pas compte des effets densitaires.

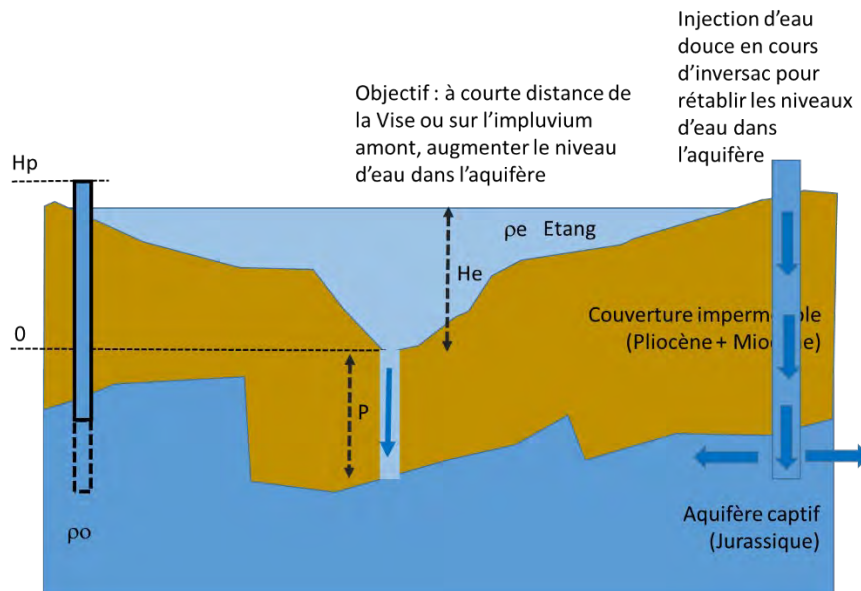


Illustration 65 : Coupe hydrogéologique verticale 2D. Schématisation d'un dispositif d'injection d'eau (recharge artificielle ou maîtrisée) à proximité de la source de la Vise

Simulations à partir des propriétés hydrodynamiques de DEMENT1

Ces modélisations ont été réalisées à partir des paramètres hydrodynamiques déduits au forage DEMENT1 (Ladouche *et al.*, 2021 ; Livrable 10). Dans ces modèles, la transmissivité de l'aquifère (Jurassique) est 8×10^{-2} (m^2/s), son emmagasinement 10^{-3} (-), le coefficient de drainance source/aquifère 5.7×10^4 (-) [ce très fort coefficient implique une connexion très forte entre la source et l'aquifère], et la demie longueur de la fracture interceptée par le puits (xf) soit 100 m (identique à la modélisation de l'essai sur DEMENT1) ou 310 m (distance entre DEMENT1 et la source). L'emmagasinement de l'aquifère de surface (Miocène) est de 5×10^{-3} (-) et la perméabilité de l'éponte qui sépare les aquifères du Jurassique et du Miocène sus-jacent est de 6×10^{-6} (m/s), son épaisseur est unitaire. La seule différence entre les deux modèles est la longueur de la fracture afin de tester la position de l'ouvrage vis-à-vis du réseau de drain de la source. Dans le modèle 1, connexion sur une zone de fracture / conduit annexe, et dans le modèle 2, connexion directe avec le conduit principal.

La figure suivante (Illustration 66) présente les résultats en terme de hausse du niveau piézométrique à la source (figure du haut) et en terme de débit d'impact sur la source (hausse du débit d'exhaure, figure du bas). Les simulations ont été réalisées pour trois valeurs de débit d'injection (200, 400 et 600 m^3/h) et sur une durée de 100 jours. Les résultats montrent qu'en terme de hausse piézométrique, le niveau évolue peu au bout d'une vingtaine de jours d'injection et que même dans des conditions favorables de localisation du puits d'injection par rapport au conduit de la source (modèle 2) et pour des débits de 600 m^3/h , l'impact sur la source reste modeste de l'ordre de +0,45 m au bout de 100 jours d'injection. En terme de débit, l'impact (augmentation du débit d'exhaure de la source) varie peu au bout d'une vingtaine de jours d'injection et est peu différent suivant les modèles. Il est compris, au bout de 100 jours d'injection, entre 55 % du débit injecté (modèle 1, soit environ 330 m^3/h pour une injection à 600 m^3/h) et 61 % (modèle 2, soit environ 370 m^3/h) pour une injection à 600 m^3/h .

D'après ces premiers modèles, l'impact en terme de hausse piézométrique à la source de la Vise est faible à modeste suivant les scénarios proposés (max. : +0,43 m) à cause de la très forte diffusivité du système (T/S : 80 m^2/s). Si on voulait augmenter le niveau piézométrique au niveau de la source de 0,5 m au bout d'une vingtaine de jours, il faudrait, d'après ces modèles, des débits d'injection de 2 500 m^3/h pour le modèle 1 et de 750 m^3/h pour le modèle 2. Pour le rehausser d'un

mètre, il faudrait dans les mêmes conditions, des débits d'injection de 4 000 m³/h (modèle 1) à 1 400 m³/h (modèle 2). En revanche, en terme de hausse du débit à la source il est, suivant les deux modèles, d'environ 50 à 56 % du débit injecté au bout d'une vingtaine de jours et de 55 à 61% du débit injecté au bout de 100 jours.

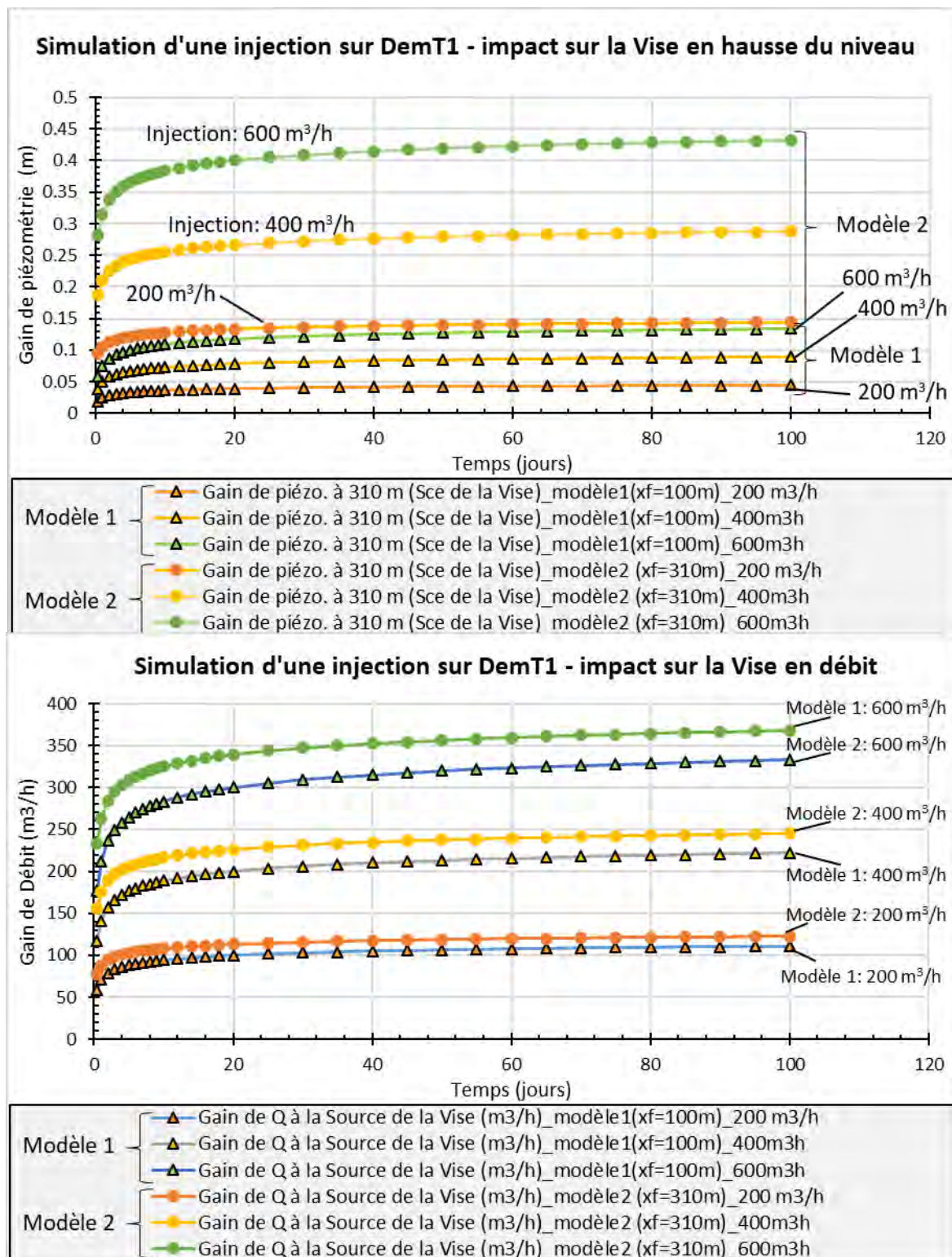


Illustration 66 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un forage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DEMENT1 avec les propriétés de DEMENT1. Trois scénarios de débit (200, 400 et 600 m³/h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte). Figure du haut : impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise et figure du bas : augmentation du débit sortant à la Vise.

Simulations à partir de propriétés hydrodynamiques moyennes du Jurassique

Ces modélisations ont été réalisées à partir des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Jurassique dans le secteur de Balaruc-les-Bains. Dans ces modèles, la transmissivité de l'aquifère (Jurassique) est 3×10^{-2} (m^2/s), son emmagasinement 2×10^{-3} (-), le coefficient de drainance source/aquifère est toujours de 5.7×10^4 (-), et la demie longueur de la fracture interceptée par le puits (xf) est soit 100 m ou 310 m. Les propriétés de l'aquifère de surface (Miocène) sont inchangées (emmagasinement : 5×10^{-3} (-) et la perméabilité de l'éponte, pour une épaisseur unitaire : 6×10^{-6} (m/s)).

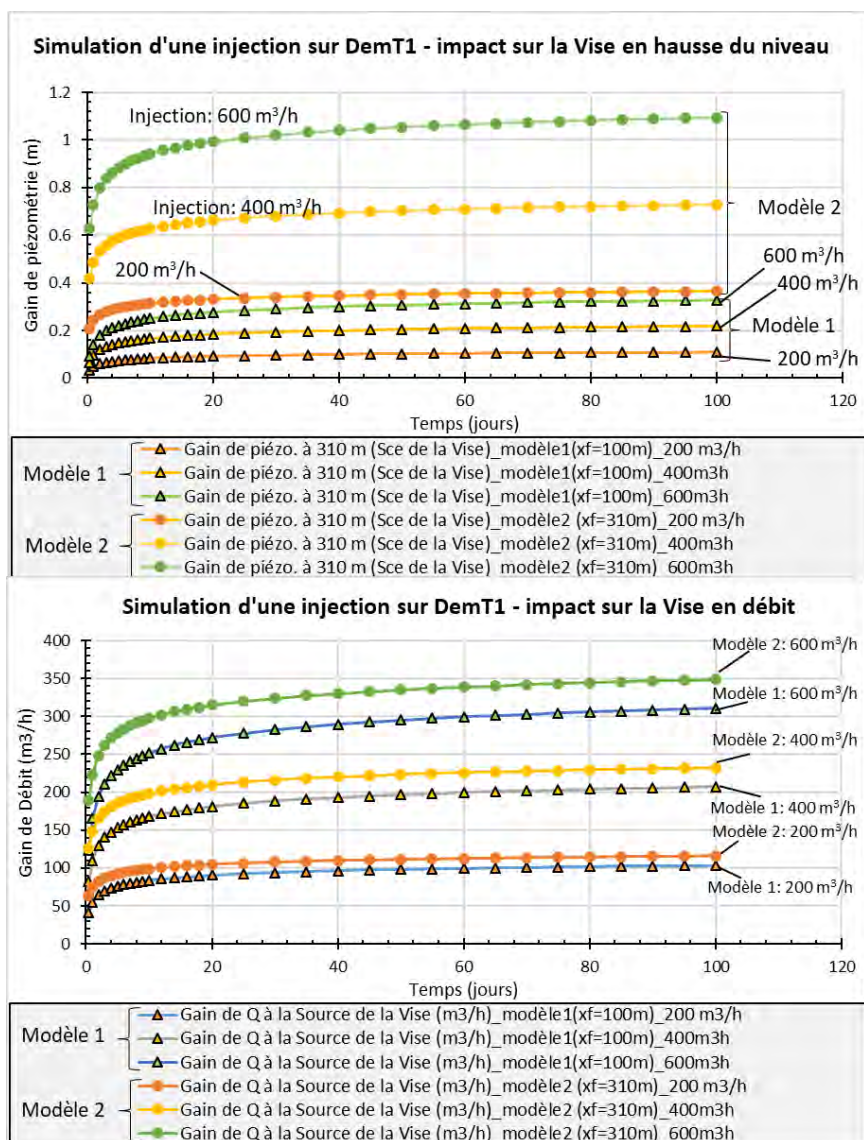


Illustration 67 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un forage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DEMT1 avec les propriétés moyennes du Jurassique. Trois scénarios de débit (200, 400 et 600 m3/h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte). Figure du haut : impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise et figure du bas : augmentation du débit sortant à la Vise.

L'illustration 67 présente les résultats en terme de hausse du niveau piézométrique à la source (figure du haut) et en terme de débit d'impact sur la source (hausse du débit d'exhaure, figure du bas). Les simulations ont été réalisées pour les mêmes valeurs de débit d'injection (200, 400 et 600 m³/h) et la même durée (100 jours). D'après ces modèles, l'impact en terme de hausse piézométrique à la source de la Vise est plus important (max. : +1.09 m) à cause de la diminution de la diffusivité du système (T/S : 15 m²/s) comparé aux simulations précédentes. Pour un débit d'injection de 200 m³/h et pour 20 jours d'injection, suivant les modèles, la hausse du niveau piézométrique fluctue entre +0.09 m (modèle 1) et +0.33 m (modèle 2), pour atteindre des valeurs comprises entre +0.11 et +0.35 m au bout de 100 jours. En ce qui concerne l'impact en terme de débit sur la source, celui-ci est relativement comparable aux simulations précédentes, il varie peu au bout d'une vingtaine de jours d'injection et est peu différent suivant les modèles. Il est compris, au bout de 100 jours d'injection, entre 52 % du débit d'injection (modèle 1, soit environ 310 m³/h pour une injection à 600 m³/h) et 58 % (modèle 2, soit environ 348 m³/h pour une injection à 600 m³/h).

6.3.2. Diminution de la salinité de la lagune

Les suivis de la salinité de la lagune de Thau réalisés par l'Ifremer à environ 1 km au Sud-Sud/Ouest de la Vise depuis 1987 montrent une évolution saisonnière et interannuelle de la salinité, les salinités maximales étant globalement observées en fin d'été/automne et les salinités minimales en fin d'hiver/début du printemps. Les inversacs récents (2008, 2010, 2014, 2020) se sont tous produits dans des contextes de salinité élevée à très élevée des eaux de la lagune (36.5 à 38.9 PSU), à l'inverse les fins d'inversac se sont globalement produites dans des contextes de faible salinité de la lagune (Illustration 68).

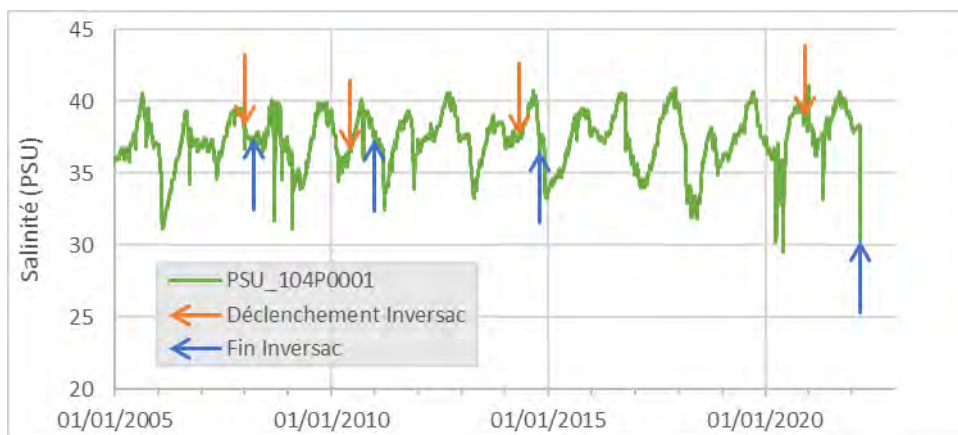


Illustration 68 : Évolution de la salinité (PSU) de la lagune au point d'observation 104P0001 (Ifremer)

L'apport d'eau douce à la lagune dans le voisinage de la Vise pourrait contribuer de manière globale à diminuer localement sa salinité et donc de réduire un peu le risque vis-à-vis du déclenchement de l'inversac. Plus globalement, selon le SMBT (L. Cesmat, communication personnelle), l'apport d'eau douce à la lagune notamment par une modification de la capacité de l'épanchoir de l'écluse du Bagnas permettrait en hautes eaux d'augmenter la part des flux d'eau douce en provenance du fleuve Hérault à l'alimentation de la lagune et ainsi contribuer à faire diminuer sa salinité.

Les flux actuels qui transitent représentent en moyenne 0.61 % du volume annuel du fleuve Hérault (1.9 % en 1996). Cette solution demanderait à être étudiée de manière plus détaillée dans le futur pour mieux apprécier la faisabilité technique et le gain potentiel en terme de diminution de la salinité globale de la lagune.

Une variation d'une unité de salinité se traduit par une variation de 0.022 m de la colonne d'eau salée au-dessus de la Vise. Les variations de la température de la lagune provoquent également des variations de la densité de la colonne d'eau au-dessus de la Vise (Illustration 69). Une variation de température de 5 °C de l'eau de la lagune provoque une amplitude de 0.036 m de variation de la colonne d'eau salée au-dessus de la Vise.

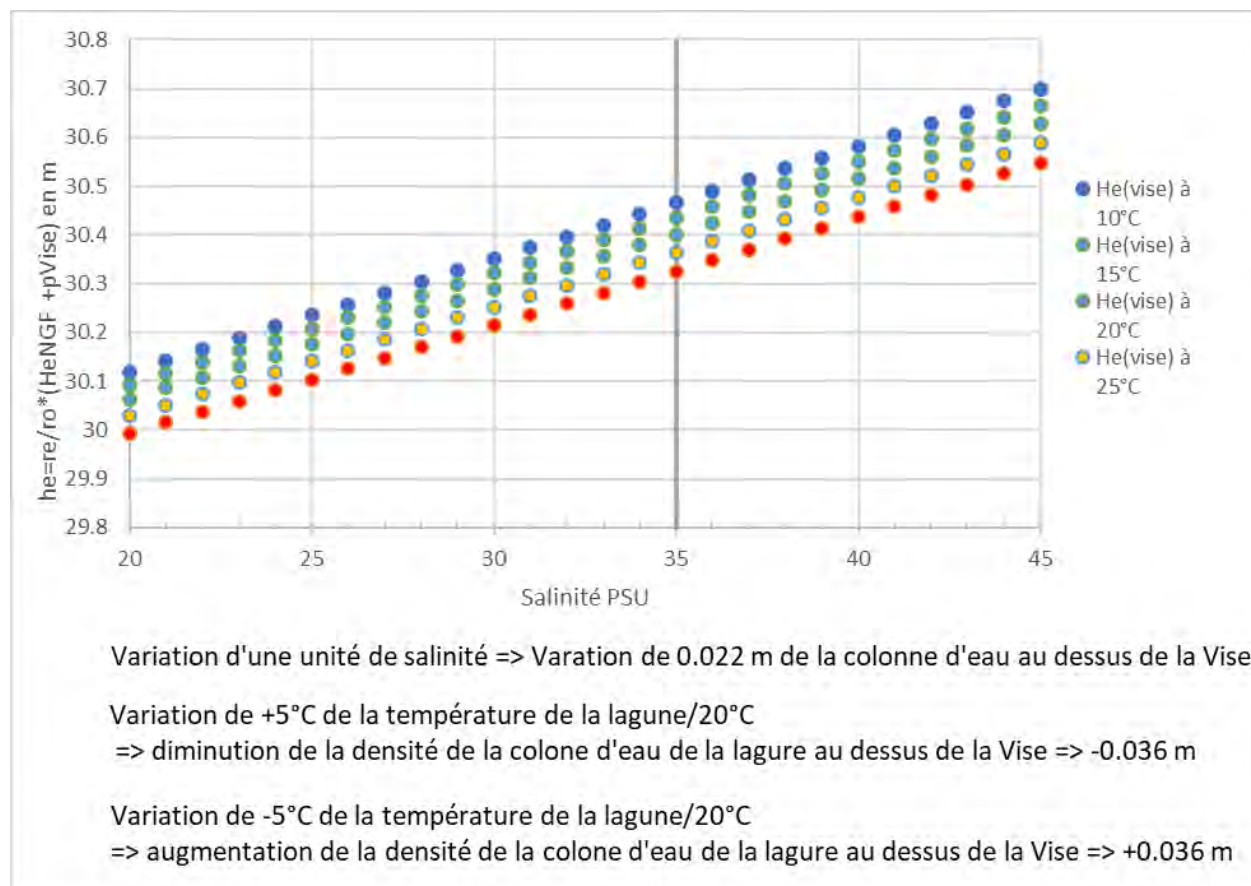


Illustration 69 : Évolution de la variable He de l'indicateur en fonction de la salinité et de la température de la lagune.

Pour une salinité donnée, les amplitudes de variations de la colonne d'eau au droit de la Vise provoquées par les modifications des paramètres de la lagune sont de l'ordre de 0.1 m, soit d'un ordre de grandeur comparable à l'amplitude des rabattements provoqués par les pompes au droit de la Vise.

6.3.3. Obturation de la source de la Vise

La solution d'obturation de la source de la Vise en cours d'inversac a déjà été mise partiellement en place par le passé sous la forme d'un clapet anti-retour disposé au niveau de la source (Combes 2011) de façon à permettre les flux ascendants au sein du conduit karstique en période normale et empêcher des flux descendants en période d'inversac (Illustration 70a). Cette solution permettrait de réduire les effets d'un inversac mais pas nécessairement de l'empêcher totalement car la configuration naturelle de la zone d'émergence de la Vise, composée d'un griffon principal (collecté par le dispositif de mesure mis en place dans le projet à -29.5 m de profondeur) et de griffons secondaires de faibles débits situés à proximité à des profondeurs plus faibles (autour de 28.5 m de profondeur) permettrait l'absorption d'eau de la lagune en direction du karst sous-jacent.

Dans ce contexte, la hauteur d'eau dans le karst constitue la variable qui apparaît le plus « facilement » modifiable par une gestion de l'hydrosystème : l'objectif serait de garder des niveaux d'eau élevés dans l'aquifère le plus longtemps possible pour réduire le risque d'inversac en contrôlant la baisse de cette hauteur d'eau en période d'étiage. Ce contrôle pourrait être exercé par une réduction volontaire des débits d'exhaure de la source de la Vise. Pour ce faire, il conviendrait d'obturer partiellement la source de la Vise au niveau de sa sortie, à -30 m sous le niveau de la lagune (Illustration 70b).

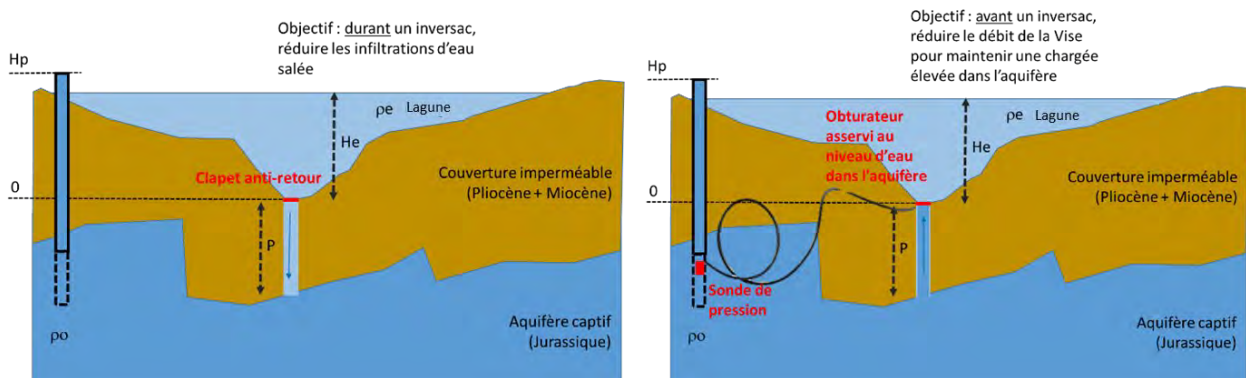


Illustration 70 : Coupes hydrogéologiques verticales 2D – Schématisation de possibles équipements pour (a – à gauche) réduire l'impact d'un inversac et (b – à droite) réduire le risque de démarrage d'un inversac

Dans l'idéal, cette obturation devrait être ajustable de façon à être en mesure de contrôler le niveau piézométrique de la nappe du Jurassique dans la presqu'île de Balaruc. Une obturation complète pourrait risquer d'induire une remontée du niveau de la nappe, induisant une inondation de structures souterraines (caves...). Dès lors, l'obturateur pourrait être couplé au système de mesure du niveau piézométrique de façon à automatiser le degré d'ouverture de l'obturateur en fonction de la hauteur piézométrique.

Au sein de la presqu'île de Balaruc, on sait, sur la base des suivis piézométriques réalisés lors des inversacs dans le voisinage de la Vise, qu'une augmentation de + 2.3 m des niveaux de l'aquifère provoque des dommages et des désordres aux structures souterraines (caves...). Les mesures réalisées en dehors des périodes d'inversac, notamment en période de crue, nous informent sur les valeurs des niveaux hauts du karst dans la partie sud de la presqu'île de Balaruc. À notre connaissance, suite aux épisodes de recharge du karst, aucun désordre de type remontée de nappe n'a été signalé dans le secteur situé à proximité de la Vise. Dans ce contexte, on peut évaluer la hauteur d'eau maximale qu'il conviendrait de ne pas dépasser dans la partie sud de la presqu'île de Balaruc. Les informations du piézomètre F4-Hotel (BSS002JDVA) indiquent que les niveaux du karst peuvent augmenter très temporairement (durée de moins d'un jour) de près de +1.3 m par rapport aux valeurs d'étiage (la cote de l'aquifère à l'ouvrage F4-Hotel à l'étiage fluctue autour de 0.6 m NGF). La confrontation des informations disponibles à P4-Balme et au forage F4-Hotel indiquent par ailleurs que la piézométrie de l'ouvrage F4-Hotel fluctue autour de 0.7 m NGF lorsque la piézométrie amont (P4-Balme) évolue entre 1.9 et 2.1 m NGF. Ces résultats indiquent que la consigne d'asservissement du débit devrait être modulée pour maintenir un niveau de l'ordre 0.8 m NGF par exemple au forage F4-Hotel (soit une charge de +0.2 m par rapport au niveau d'étiage naturel).

Il est entendu qu'une obturation totalement étanche de la source est techniquement difficile au vu du caractère diffus, autour de la source, des venues d'eau douce dans l'étang en période normale. Ce n'est pas l'objectif du dispositif qui est de réduire les flux d'eau de l'aquifère vers l'étang et non de les annuler. Cette solution permet de maintenir un fonctionnement de la Vise proche de la normale durant une grande partie de l'année tout en évitant les impacts catastrophiques d'un inversac sur la qualité de l'eau de la nappe.

Pour être totalement opérationnelle, cette solution nécessite d'étudier l'impact, à l'échelle hydrologique du compartiment aval de l'entité AVIC, d'une réduction du flux de sortie à la source de la Vise, sur les niveaux piézométriques au sein de l'aquifère (à P4-La Balme ou CGE Tennis par exemple). Ceci pourrait être testé avec le modèle numérique MARTHE développé dans le cadre de ce projet (Hakoun et Ladouche 2022, Livrable L11A : [BRGM/RP-71757-FR](#)). Ce modèle pourrait éventuellement permettre de déterminer la meilleure relation entre un débit objectif de la Vise en fonction du niveau piézométrique dans l'aquifère pour optimiser la gestion active de ce système.

Dans le cadre de ce rapport, l'impact sur le niveau piézométrique de l'aquifère à proximité immédiate de la Vise, d'une diminution du débit de la Vise par une obturation, a été évalué à l'aide des solutions analytiques mises en œuvre pour interpréter les résultats des essais de pompage. La configuration testée est mixte, on se place à la fois dans le cas où on injecte un flux d'eau dans un forage situé à proximité de la Vise (310 m) tout en se gardant la possibilité de réduire le débit d'exhaure de la source (obturation partielle).

Simulations (injection d'eau dans un forage couplé à une réduction des flux d'exhaure de la Vise : obturation partielle)

Des simulations sont proposées, à partir des propriétés moyennes du Jurassique pour apprécier l'impact sur les charges hydrauliques d'une réduction de débit de la Vise. Les simulations proposées ont été réalisées à partir des modèles présentés au paragraphe précédent, soit avec les propriétés moyennes de l'aquifère du Jurassique et pour les deux configurations de dimension de fracture.

Le puits d'injection est toujours situé à 310 m de la source. La réduction du débit d'exhaure de la source a été modélisée en faisant varier le coefficient de drainance source/aquifère jusqu'à obtention de la réduction souhaitée. Dans la réalité, la réduction du débit à la source pourrait être obtenue par équipement d'un système de vannage. Les scénarios testés (Illustration 71) concernent des réductions de 25, 50 et 75 % du débit à la source pour une gamme de débit d'injection de 100 à 600 m³/h et une durée d'injection de 20 jours. Sont aussi représentées sur la figure les situations sans réduction du débit de la source, il s'agit des résultats de modèles précédents (Illustration 67 ; gamme de débit : 200-600 m³/h).

Ces dernières modélisations montrent, par exemple, qu'une réduction de 25 à 50 % du débit de la Vise, devrait faire augmenter, d'après ces modèles, la charge hydraulique dans l'aquifère au niveau de la Vise. Dans le cas du modèle 1 (xf = 100 m), cette augmentation est évaluée entre 0.26 à 0.86 m pour une gamme de débits d'injection de 200 à 400 m³/h, à comparer avant réduction à une hausse piézométrique comprise entre 0.09 et 0.18 m ; soit un gain de 0.17 à 0.68 m. Pour l'autre modèle de fracture (modèle 2 ; xf = 310 m), la hausse est encore plus importante, de 0.47 à 1.51 m pour la même gamme de débit, soit un gain de 0.14 à 0.85 comparé à la situation avant réduction (hausse piézométrique avant réduction : 0.33 et 0.66 m).

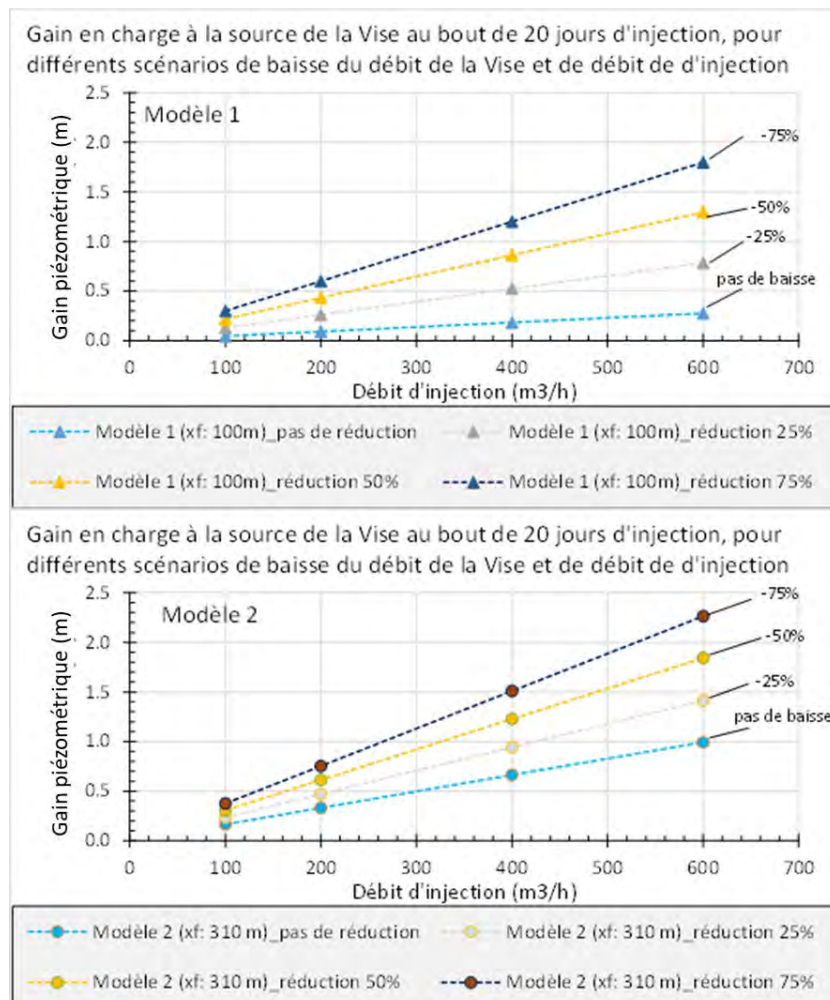


Illustration 71 : Solutions pour diminuer ou empêcher un inversac par injection d'eau douce dans un forage à proximité de la Vise. Cas d'un forage situé au niveau de DMT1 avec les propriétés moyennes du Jurassique. Impact en terme de hausse du niveau piézométrique à la Vise. Quatre scénarios de débit (100, 200, 400 et 600 m³/h) et deux scénarios de modélisation sont testés (voir texte), pour trois scénarios de réduction du débit à la source. Haut : modèle 1 (xf = 100 m) et bas : modèle 2 (xf = 310 m).

En conclusion, cette solution qui vise à injecter de l'eau douce par forage ne semble pas, compte tenu de la variation modeste de charge occasionnée (de quelques cm à 0,5 m suivant le modèle de fracture), pour une gamme raisonnable de débits compris entre 100 à 300 m³/h, être l'unique solution à envisager pour réduire le risque d'inversac. Elle peut, par contre, être une solution d'appoint intéressante, en complément d'autres solutions plus efficaces sur le long terme (réduction/vannage du débit d'exhaure de la source de la Vise), qui pourrait être utilisée durant des périodes bien définies (par exemple durant 10 à 20 jours) et, lorsque les niveaux sont bas et en situation pré-inversac. Cette solution sera d'autant plus efficace si la source est équipée d'un système de vannage occasionnel, ce qui devrait encore plus augmenter la charge dans l'aquifère au droit de la source. D'après les calculs, elle devrait être de l'ordre de la dizaine de cm à +0,3 m, pour une réduction du débit de la source de 25 % dans le cas d'un débit d'injection de 100 m³/h durant 20 jours. Par ailleurs, se pose à cette solution d'injection deux problèmes techniques majeurs : le premier consiste à réaliser et dimensionner un ouvrage d'injection interceptant le même conduit karstique que celui de la source, ou un autre conduit bien connecté, et le deuxième est de permettre l'acheminement d'importants volumes d'eau douce pour assurer l'injection. Pour une durée de 20 jours et une injection à 100 m³/h, cela représente 48 000 m³.

7. Conclusion

Le réseau d'observation mis en place dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau a permis d'acquérir de précieuses informations sur l'inversac de 2020-2022 qui s'est déroulé entre le 27 novembre 2020 et le 14 mars 2022.

Ces informations de nature hydrogéologique ont permis de proposer une hypothèse de mécanisme de mise en place de l'inversac ainsi que de proposer 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.

Le mécanisme de mise en place de l'inversac est expliqué par des conditions de gradient hydraulique de charge, corrigées de la densité de l'eau, fluctuantes au cours du cycle hydrologique. En hypothèse hydrostatique, 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. Ils sont faibles lorsque le niveau de la lagune et sa salinité sont peu élevés alors que les niveaux dans l'aquifère sont hauts. Il met également en évidence l'importance de ces variables que sont la hauteur d'eau dans la lagune, la hauteur piézométrique dans l'aquifère et la salinité de l'aquifère pour une surveillance future du phénomène.

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 +/- 10 m NGF au niveau du conduit karstique. 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.

La réalisation d'une modélisation numérique des écoulements et du transport de sel souterrains 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 vaincre 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 cet indicateur permettra d'identifier les risques d'inversac. Nous recommandons de poursuivre ce suivi à un pas de temps fin (horaire). Cet indicateur a été enrichi par la prise en compte de changements de stratégie de pompage autour de la source de la Vise : les premiers résultats semblent cohérents et indiquent que les pompages conduisent à des rabattements de quelques centimètres voire de l'ordre de 0.1 m selon l'importance des débits cumulés de la charge au droit de la Vise.

Les tests de sensibilité indiquent par ailleurs, que les variations de la salinité et de température de lagune font également varier la colonne d'eau au-dessus de la Vise : une variation d'une unité de salinité provoque 0.022 m de variation de la colonne d'eau (les variations saisonnières provoquent environ 0.15 m de variation) ; 15 °C de variations de température de l'eau de la lagune provoquent une variation de l'ordre de 0.1 m de la colonne d'eau.

Les éléments de compréhension qui sont à notre disposition à ce jour permettent de mettre en évidence les rôles joués par la hauteur d'eau dans l'étang et par la piézométrie dans l'aquifère du Jurassique lors de la mise en place d'un inversac. Dans ce contexte, c'est la hauteur d'eau dans le karst qui apparaît le plus « facilement » modifiable par une gestion concertée de l'hydrosystème, l'objectif étant de garder des niveaux d'eau élevés dans l'aquifère le plus longtemps possible pour réduire le risque d'inversac en contrôlant la baisse de cette hauteur d'eau en période d'étiage. Ce contrôle pourrait être exercé par une réduction volontaire du débit d'exhaure de la source de la Vise ou par injection d'eau à proximité de la vise voire même par une solution mixte (injection/réduction des débits de la Vise). Ces différentes solutions de remédiation ont été étudiées et évaluées dans cette étude.

La solution d'obturation de la source de la Vise a déjà été réalisée partiellement par le passé sous la forme d'un clapet anti-retour disposé au niveau de la source (Combes 2011) de façon à permettre les flux ascendants au sein du conduit karstique en période normale et empêcher des flux descendants en période d'inversac. Cette solution permettrait de réduire les effets d'un inversac mais pas nécessairement de l'empêcher car la configuration naturelle de la zone d'émergence de la Vise composée d'un griffon principal (collecté par le dispositif de mesure mis en place dans le projet à -29.5 m de profondeur) et de griffons secondaires de faibles débits situés à proximité à des profondeurs plus faibles (autour de 28.5 m de profondeur) permettrait l'absorption d'eau de la lagune en direction du karst sous-jacent.

Dans l'idéal, il conviendrait d'obturer partiellement la source de la Vise au niveau de sa sortie principale, à -29.5 m sous le niveau de la lagune. Le dispositif d'obturation de la Vise devrait être ajustable/modulable de façon à être en mesure de contrôler le niveau piézométrique de la nappe du Jurassique dans la presqu'île de Balaruc. En effet, une obturation complète de l'exhaure principal provoquerait probablement une remontée trop importante du niveau de la nappe, induisant une inondation de structures souterraines (caves...), ceci pourra être évalué ultérieurement par modélisation à l'aide du modèle hydrogéologique 3D. Dès lors, l'obturateur pourrait être couplé au système de mesure du niveau piézométrique de façon à automatiser le degré d'ouverture de l'obturateur en fonction de la hauteur piézométrique

En absence de dispositif de réduction de débit de la Vise, l'autre solution pour maintenir des niveaux d'eau élevés dans le karst serait la recharge artificielle (ou maîtrisée) de l'aquifère à proximité de la Vise par injection d'eau dans un ouvrage conçu spécifiquement pour cet usage.

Dans le cadre du projet DEM'EAUX Thau, les investigations réalisées sur l'ouvrage DemT1 de la plateforme expérimentale ont montré que le forage intercepte une zone de fracture/drain en connexion avec la source de la Vise située à environ 310 m. Les modélisations des résultats des essais de pompage réalisés sur cet ouvrage permettent la caractérisation des paramètres hydrauliques de l'aquifère ainsi que des informations sur la structure de l'aquifère dans cette partie de la presqu'île de Balaruc. Sur la base de ces résultats, les modèles développés ont été utilisés pour apprécier si, en injectant une certaine quantité d'eau dans l'aquifère, il est possible ou pas de faire suffisamment remonter le niveau piézométrique de l'aquifère au droit de la source et ainsi réduire le risque de survenu d'un inversac. Ces simulations ne tiennent pas compte des effets densitaires. Deux situations théoriques ont été considérées, la première en considérant les propriétés d'un ouvrage très bien connecté à la Vise (« type DemT1 »), la seconde en considérant les propriétés hydrauliques moyennes de l'aquifère du Jurassique au niveau de Balaruc. Dans un second temps, ces mêmes modèles ont été utilisés en considérant la possibilité d'une réduction du débit à la source qui pourrait être obtenue par équipement d'un système de vannage (solution mixte

injection et réduction du débit de la Vise). L'approche permet d'évaluer la réponse du karst pour différentes configurations de durée d'injection (10 jours, 20 jours, ...). Elle montre que l'augmentation du niveau piézométrique obtenue au niveau de la Vise est relativement faible en regard des volumes injectés.

En conclusion, une solution de remédiation basée sur une réduction/vannage du débit d'exhaure de la source de la Vise asservi à l'évolution de la piézométrie de l'aquifère apparaît la solution la plus pragmatique sur le long terme. En contexte très déficitaire de précipitation et donc de recharge de l'aquifère, une solution de remédiation mixte consistant à injecter de l'eau douce par forage couplé à une réduction des débits de la source de la Vise pourrait s'avérer une solution transitoire envisageable pour réduire le niveau de risque de déclenchement d'un inversac. Cette dernière solution basée sur un débit d'injection soulève deux problèmes techniques majeurs. Le premier consiste à réaliser et dimensionner un ouvrage d'injection interceptant le même conduit karstique que celui de la source, ou un conduit bien connecté, et le second suppose que l'on puisse acheminer d'important volume d'eau douce pour assurer l'injection. Pour une durée de 20 jours et une injection à 100 m³/h, cela représente 48 000 m³.

Enfin, la solution technique qui permettrait de moduler le débit de la source de la Vise en fonction de la piézométrie (et les aménagements associés) demanderait à être étudiée et testée de façon détaillée, notamment en terme d'impact sur la qualité de l'eau de la lagune et les milieux aquatiques associés.

8. Bibliographie

- Bloomfield, J. P. and Marchant, B. P.** (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4769–4787.
- Collenteur, R.A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S.A., Schaars, F.** (2019). Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater*. doi: 10.1111/gwat.12925.
- Combes** (2011). Réflexions préliminaires à la fermeture épisodique de la source de la Vise. Consultant de l'Etablissement Thermal de Balaruc-Les-Bains, 33p
- Gutierrez, A., Klinka, T., & Thiery, D.** (2012). Manuel d'utilisation de TRAC: Aide à l'interprétation de traçages en milieux poreux. *BRGM Rapport RP-60660-FR*.
- 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. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135003002>
- Hakoun V., Ladouche B.** (2021). Modélisation hydrogéologique numérique de l'aquifère karstique de Thau. Rapport BRGM/RP-71757-FR
- 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), 1471–1480.
- Kruseman, G.P. and de Ridder, N.A.** (2000). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. 2nd Edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 372.
- Ladouche B, Lamotte C** (2014). Inversac de la source sous-marine de la Vise en 2014. Recueil des informations disponibles en date du 22/07/2014. Rapport BRGM RP-63841-FR – août 2014.
- Ladouche B, Lamotte C** (2015). Inversac de la source sous-marine de la Vise en 2014 : Recueil et analyse des données disponibles. Rapport final. BRGM/RP - 64812 - FR, 82 p., 56 ill. .
- Ladouche, B., Lamotte, C., Hemelsdael, R., Pétré, M.-A., Dewandel, B., Léonardi, V., Seidel, J.-L., & Seranne, M.** (2019). *DEM'Eaux Thau - Synthèse et valorisation préliminaire des données sur l'hydrosystèmes de Thau (34) - Livrable 1. Rapport RP-68483-FR*. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68483-FR.pdf>
- Ladouche B., Dewandel B., Lamotte C., Pezard P., Séranne M.** (2021). Plateforme DEM'Eaux Thau - 1ères acquisitions sur la source de la Vise, forages DENT1, DENT2, DENT3 – Livrable L10 – Rapport final. BRGM/RP-70842-FR
- McKee, T B, Doesken, N. J., Kleist, J., & Society, A. M.** (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. *9th Conference, Applied Climatology*, 233–236. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLCP%3ACN008169111>
- McKee, Thomas B, Doesken, N. J., & Kleist, J.** (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- Ogata, A., & Banks, R. B.** (1961). *A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media: fluid movement in earth materials*. US Government Printing Office.
- Pétré M-A., Ladouche B., Seidel J-L., Hemelsdaël R., de Montety V., Batiot-Guilhe C., Lamotte C.** (2020). Hydraulic and geochemical impact of occasional saltwater intrusions through a submarine spring in a karst and thermal aquifer (Balaruc peninsula near Montpellier, France). *HESS*, doi.org/10.5194/hess-2020-292

Annexe 1

Détail sur le réseau d'observation

Liste des points du réseau d'observation du projet DEM'Eaux Thau

Code BSS	ancien Code BSS	Nom commune	Appellation/lieu-dit	Abreviation	x L93	y L93	Réseau/producteur	Suivi actuel
BSS002JEKE	10166X0253/P4	BALARUC-LES-BAINS	P4 La Balme	P4_Balme	756846	6262232	BRGM/AFB	PTC
BSS002JEKD	10166X0252/AMBRES	BALARUC-LES-BAINS	Source Ambressac	Sce_Amb	756539	6260705	BRGM puis SMBT	HTC
BSS002JDNI	10165X0021/CAUVY	BALARUC-LES-BAINS	Source Cauvy	Sce_Cauvy	755378	6260974	CD34	PTC
BSS002JDNI	10165X0021/CAUVY	BALARUC-LES-BAINS	Source Cauvy	Sce_Cauvy	755453	6260924	SMBT	HQ
-	-	BALARUC-LES-BAINS	Etang THAU	Lagune THAU	754483	6260247	Thermes	H
BSS002JDXG	10165X0257/F14	BALARUC-LES-BAINS	Forage F14 Thermes	F14	754506	6260253	Thermes	PTCQ
BSS002JDUZ	10165X0183/F3	BALARUC-LES-BAINS	F3 (Parking)	F3	754658	6260536	Thermes	PTC
BSS002JDVA	10165X0184/F4	BALARUC-LES-BAINS	F4 Hôtel	F4 Hôtel	754868	6260789	BRGM/AFB	PTC
BSS002JDMR	10165X0185/F5	BALARUC-LES-BAINS	Forage F5 (MOURE)	F5	754589	6260576	Thermes	PTCQ
BSS002JDXA	10165X0251/F6	BALARUC-LES-BAINS	Forage F6 (Hespéride)	F6	754676	6260877	BRGM/Demeaux	PTC
BSS002JDWH	10165X0234/SNTCLR	BALARUC-LES-BAINS	Forage F8 (Saint Clair)	F8	754773	6259905	Thermes	PTCQ
BSS002JDXB	10165X0252/F9	BALARUC-LES-BAINS	Forage F9 (Ase)	F9	754588	6260575	Thermes	PTCQ
BSS002JDMR	10165X0004/ISTPE	BALARUC-LES-BAINS	la Vise	la Vise	754410	6260718	BRGM/Demeaux	PTCQ, H Lagune
BSS002JDNIH	10165X0020/Therma	BALARUC-LES-BAINS	S12 Ecole Balaruc	S12	754907	6260374	SMBT	PTC
BSS002JCZU	10162X0194/BV39	BALARUC-LE-VIEUX	F2 Frescaly	Frescaly	756045	6263857	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018	P puis PTC
BSS002JCZV	10162X0195/BV41	BALARUC-LE-VIEUX	F3 Vignes	Vignes	755910	6263913	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2018	P puis PTC
BSS002JGMA	10161X0226/BV146	BALARUC-LE-VIEUX	F5 Autoroute	F5 Autoroute	755375	6263992	SETE/SUEZ puis SMBT 2ème trimestre 2019	P puis PTC
BSS002JEHM	10166X0012/BV83	BALARUC-LE-VIEUX	CGE Tennis	CGE_Tennis	755777	6262898	BRGM/AFB	PTC
BSS002JCUI	10162X0030/DEBIT	BALARUC-LE-VIEUX	Station jaugeage Vène, aval CC Issanka	Station_Vène aval CC Issanka	756168	6264296	HSM, SMBT depuis 2019	Q
BSS002JCUI	10162X0029/DEBIT	COURNONSEC	Station jaugeage Vène, Pont D5	Station_Vène amont	756337	6270693	HSM	Q
BSS002JDBC	10162X0226/V	COURNONSEC	Piézo Vène	pz trop-plein Vène	756188	6270819	BRGM/AFB	PT
BSS004AWUN	BSS004AWUN/X	LOUPIAN	Cambellès	Cambellès	751107	6262201	SMBT	PCT
BSS002GPFS	09906X0161/PZ1	PIGNAN	Maison de retraite	Pignan, retraite	760362	6276230	BRGM/AFB	P
BSS002GPFR	09906X0160/BLIDOU	PIGNAN	Bouillou	Bouillou	759834	6275755	SBL	PQ
BSS002GPFN	09906X0157/FP	PIGNAN	Olivet	Olivet	762375	6278100	SBL	PQ
BSS002JCUL	10162X0010/ISKA	POUSSAN	Source Issanka	Pavillon Issanka	756512	6264734	SETE/SUEZ, BRGM/Demeaux depuis 2019	PTC
BSS002JCFZ	10162X0177/BOURGE	POUSSAN	Source Pavillon Bourges	Pavillon Bourges	756313	6264415	SETE/SUEZ, BRGM/Demeaux depuis 2019	PTC
BSS002JCSQ	10161X0360/PIEZ	POUSSAN	Forage Carrière GSM	Forage Carrière GSM	751878	6264630	SMBT	PTC
BSS002PYCD	BSS002PYCD	POUSSAN	Piézo Carrière GSM	Piézo Carrière GSM	751198	6266023	GSM/ Barga Sud	PTC
BSS003CGKO	BSS003CGKO	SETE	Forage Stade Michel	pz Stade-Michel	754219	6257281	BRGM/Demeaux	PTC
BSS002JCLT	10161X0170/FARRIL	VILLEVEYRAC	La Calade St Farriol	La Calade (St Farriol)	749368	6266070	Mairie de Villeveyrac/BRL	PQ
BSS002JCZS	10162X0188/F4	BALARUC-LE-VIEUX	LES MOULIÈRES BASSE	F5_Moulières	756442	6264094	SMBT	PTC
BSS003CINI	BSS003CINI/X	BALARUC-LE-VIEUX		Cèdre	757192	6264258	SMBT	PT

P: Pression ; T: Température ; C: Conductivité ; H: Hauteur ; Q: Débit

Annexe 2

Statistique descriptive de la chronique de salinité de l'étang

Mois	Moyenne de PSU_104P0001	Max de PSU_104P0001	Min de PSU_104P0001
1	35.8	39.8	27.8
2	35.2	39.6	27.1
3	35.1	39.8	26.9
4	35.1	39.5	26.4
5	35.4	38.5	28.3
6	36.3	39.2	29.5
7	37.4	39.9	33.1
8	38.4	40.8	34.2
9	38.7	40.7	31.8
10	38.3	40.6	33.3
11	37.4	40.9	30.5
12	36.3	41.2	29.2

Statistique descriptive de la chronique de salinité de la station 104P0001 (<https://wwz.ifremer.fr/surval/>), période 1987-2020.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction Régionale Occitanie

Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie

1039 rue de Pinville

34000 – Montpellier – France

Tél. : 04 67 15 79 90

www.brgm.fr