

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
Caractérisation transdisciplinaire d'un aquifère côtier complexe, pour une exploitation maîtrisée et durable de sa ressource en eau en contexte méditerranéen. Le projet DEM'EAUX ROUSSILLON.
Nom des auteurs
CABALLERO, Yvan ¹ ; DUVAIL, Cédric ² ; CHAZOT, Sébastien ³ ; BOUCHETTE, Frédéric ⁴ ; DOBRICEAN, Octavian ⁵ ; ALLOUIS, Tristan ⁶ ; ASSEMBAUM, Michel ⁶ ; BALOUIN, Yann ¹ ; BASSETTI, Marie-Angèle ⁷ ; BAUDOUY, Lucie ² ; BERNE, Serge ⁷ ; BOSIO, Camille ; BOURGINE, Bernard ⁹ ; BOURRIN, François ⁷ ; BRUN, Laurent ⁴ ; CHAMPOLLION, Cédric ⁴ ; CHAUVEAU, Mathilde ³ ; DALL'ALBA, Valentin ¹² ; DEWANDEL, Benoît ¹ ; FIORAVANTI, Anna ² ; GARIN, Patrice ⁸ ; HENRY, Gilles ⁴ ; ISSAUTIER, Benoît ⁹ ; JACOB, Thomas ⁹ ; LAOUENAN, Sonia ⁷ ; LADOUICHE, Bernard ¹ ; LANINI, Sandra ¹ ; LAURENT, Sylvain ³ ; LEMOIGNE, Nicolas ⁴ ; LE MOING, Floriane ¹⁰ ; LOFI, Johanna ⁴ ; MAUFFREY, Marie-Aline ⁷ ; MONTGINOUL, Marielle ⁸ ; NADAL, Grégoire ¹¹ ; NEVERRE, Noémie ¹ , PALVADEAU, Eric ¹ ; PETIT, Adrien ⁸ ; PEZARD, Philippe ⁴ ; RAYNAUD, Jean-Baptiste ⁶ ; RENARD, Philippe ¹² ; RINAUDO, Jean-Daniel ¹ ; SEGUIN Laura ⁸ , TACHRIFF, Hichem ¹¹ ; VIGOUROUX, Philippe ¹
Affiliation
<p>(1) BRGM- UMR GEAU, Université de Montpellier - correspondant : y.caballero@brgm.fr (2) FUGRO France, Castries (3) BRL Ingénierie, Nîmes (4) UMR Géosciences, Université de Montpellier (5) Synapse Informatique, Grabels (6) Yellow Scan, Montferrier-sur-Lez (7) UMR CEFREM, Université de Perpignan (8) INRAE - UMR GEAU, Montpellier (9) BRGM, Orléans (10) Syndicat Mixte du Bassin Versant de la Têt, Perpignan (11) Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon, Perpignan (12) CHYN, Université de Neuchâtel (Suisse)</p>

Plus de 80 millions de m³ d'eau souterraine sont prélevés chaque année dans les nappes de la plaine du Roussillon (850 km²), bordée par les Pyrénées à l'ouest, le massif des Corbières au nord et la Méditerranée à l'est. Cette ressource est d'abord destinée à l'alimentation en eau potable des populations, en forte augmentation depuis les années 1950. A cela s'ajoute un tourisme estival qui s'est développé, avec 32 millions de nuitées par an (dont 60% sur le littoral). Par ailleurs, 13 000 hectares de terres sont irrigués sur cette zone.

L'aquifère Plio-Quaternaire du Roussillon est un aquifère multicouche constitué de formations alluviales du Quaternaire surmontant des niveaux de sables et argiles du Pliocène, sur une épaisseur pouvant atteindre 300 m. Les formations alluviales quaternaires et les sables du Pliocène contiennent une ressource en eau douce qui, sur la bordure littorale, est susceptible d'être contaminée par l'eau de mer, en cas d'exploitation trop importante. L'enjeu de la protection des ressources de cet aquifère est donc crucial et ne peut être traité sans une amélioration substantielle des connaissances. Pour gérer au mieux cette ressource en eau souterraine, plusieurs questions se posent (Figure 1): quelles sont les caractéristiques des niveaux aquifères (géométries et propriétés hydrodynamiques)? Jusqu'où s'étend le réservoir sous la mer et l'eau y est-elle douce? Quelles sont les interactions avec les aquifères environnants (le karst des Corbières) et avec la mer? Quels sont les risques actuels d'intrusions salines liées à l'exploitation de la ressource notamment en période estivale et quelle sera ce risque dans le futur dans le contexte d'élévation du niveau marin? Comment vont évoluer les besoins en eau, avec des épisodes de sécheresse potentiellement plus marqués à l'avenir? Comment utiliser au mieux les nouvelles technologies pour, par exemple, proposer un outil de gestion en temps réel de la ressource et du risque d'intrusion saline?

Pour répondre à ces questions, le projet Dem'Eaux Roussillon a réuni des géologues, géophysiciens, géochimistes, hydrogéologues, hydrologues, économistes de l'environnement et informaticiens, pour décrire cet ensemble aquifère et son exploitation, à terre et en mer et comprendre ses interactions avec le climat, les eaux de surface et la mer. Ce projet a reçu le soutien financier l'Etat et de la Région Occitanie (dans le cadre du Contrat de Plan Etat-Région 2015-2020), du FEDER, de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, de Perpignan Méditerranée Métropole et de Conseil Départemental des Pyrénées Orientales

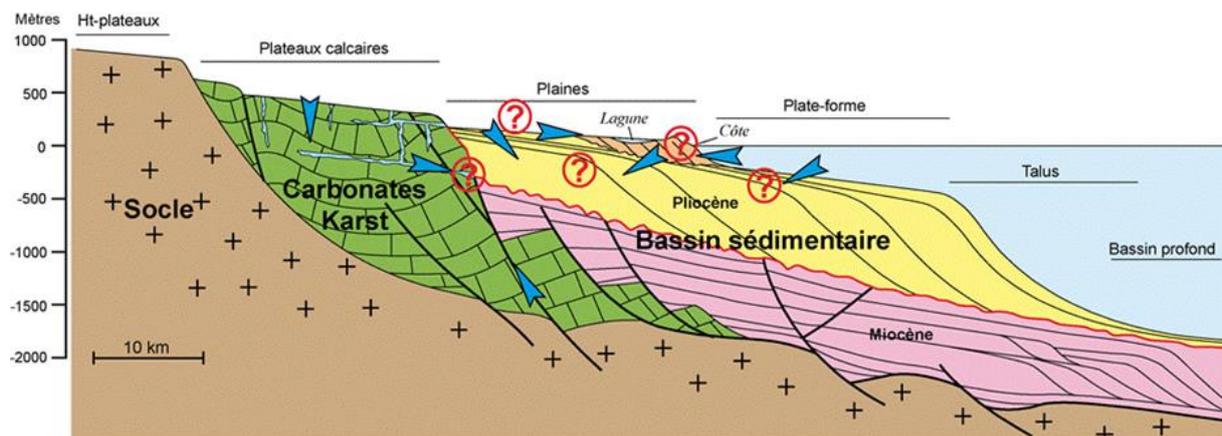


Figure 1 : Situation des aquifères sédimentaires côtiers et des interactions avec leur environnement (Duvail et Aunay, 2005).

Les travaux ont été organisés en cinq ateliers: 1) Caractérisation géologique ; 2) Usages de l'eau ; 3) Interactions littorales ; 4) Caractérisation hydrogéologique et 5) Plateforme de valorisation, présentés schématiquement ici et plus en détail dans Caballero et al., (2022c).

Caractérisation géologique et géophysique

Pour compléter les connaissances existantes sur les faciès géologiques et leur géométrie (Duvail, 2008), un travail de terrain et d'analyse de données (2 forages carottés, 180 descriptions lithologiques, 100 diagraphies, 2500 stations gravimétriques à terre et des dizaines de profils de sismique marine corrélés) a été mené pour aboutir à la production d'un modèle géologique (Figure 2, Duvail et al., (2021), Issautier et al., (2021), Caballero et al., (2022a), Duvail et al., (2022), Fioravanti et al., (2022)).

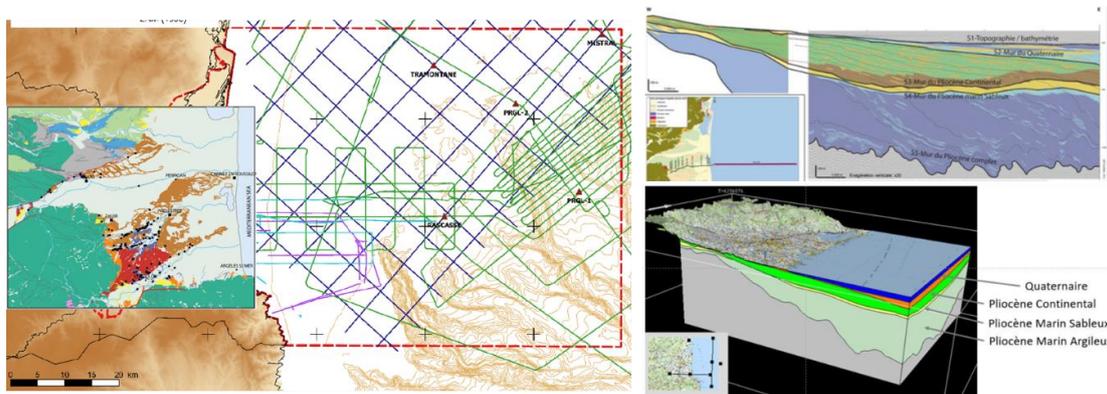


Figure 2 : Données utilisées pour le modèle géologique Terre-Mer de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon.

Le prolongement des niveaux aquifères sur plus de 30 km sous la mer vers l'est, a ainsi pu être démontré et pose la question de la distribution spatiale des faciès perméables. Ceci est étudié au travers d'approches de géostatistique multipoint dans le cadre d'une thèse de doctorat (Dall'Alba et al. 2020). Un suivi à haute résolution spatiale et temporelle des caractéristiques et du comportement de l'eau souterraine a été entrepris au travers de l'installation de deux observatoires hydrogéophysiques situés, l'un dans une des zones de recharge par les précipitations (Dem'Ter, à Pollestres), l'autre en bordure côtière (Dem'Mer, à Canet-en-Roussillon) (Caballero et al., 2022a). Ils permettent d'observer les processus de recharge/pollutions anthropiques, pour le premier et les liens entre drainage et de salinisation des aquifères, pour le second.

Usages de l'eau

Une estimation fine des usages de l'eau potable et agricole à l'échelle du territoire étudié était nécessaire pour évaluer son évolution actuelle et les confronter aux ressources en eau disponibles pour les alimenter. Pour quantifier le type de ressource en eau utilisée pour l'irrigation (surface – canaux ou cours d'eau ; souterraine) et tenter de décrire avec précision les nombreuses interconnexions entre eaux de surface et souterraine, une cartographie et une caractérisation des surfaces irriguées en maraîchage et en arboriculture ont été réalisées (Figure 3 gauche, Chauveau et al., 2021) et une estimation de leur intérêt économique a été tentée (Bosio & Lavenue, 2021). Ces résultats confirment la poursuite de l'importante réduction des surfaces en maraichages et vergers observée depuis 40 ans sur le territoire (réduction qui serait même de l'ordre de 40% sur les 15 dernières années).

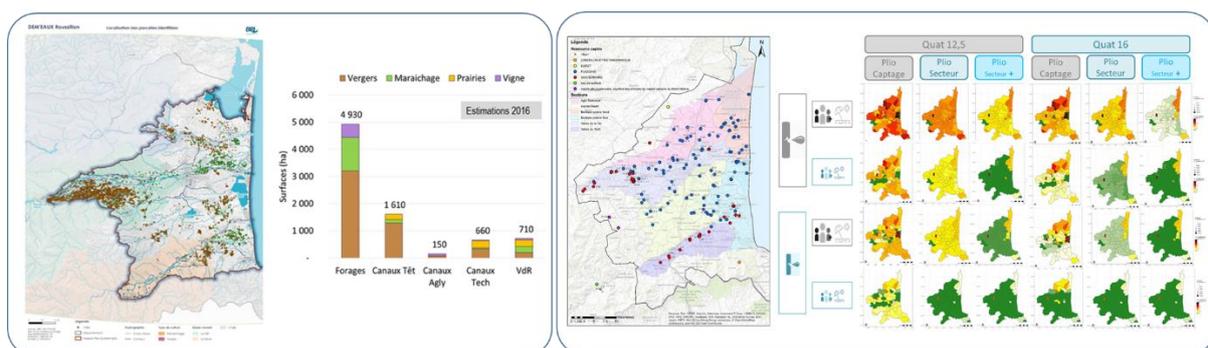


Figure 3 : Caractérisation des usages de l'eau agricole (gauche) et en eau potable (droite). Des scénarios d'évolution de la

demande en eau potable peuvent mettre en tension la distribution de l'eau du territoire.

Pour explorer dans quelle mesure l'évolution future de la demande en eau potable permettra de respecter les volumes prélevables, un prototype d'outil d'optimisation de l'utilisation de l'eau potable en fonction de la ressource disponible a été entrepris (Figure 3 droite, Soullignac et al., (2022), Montginoul, (2022), Neverre & Mathey, (2022)). Outre le fait de confirmer que les tensions diminuent lorsque l'on améliore les rendements ou l'on accepte d'augmenter les volumes prélevables, ce type d'analyse permet également d'illustrer dans quelle mesure le fait d'introduire de la souplesse dans les contraintes d'utilisation des VP (par secteurs plutôt qu'au forage) limite les situations de tension.

Pour analyser dans quelle mesure les études d'acquisition de connaissances permettent d'éclairer les choix des gestionnaires du territoire, une analyse rétrospective sur les liens entre travaux techniques et scientifiques d'une part et les documents de planification de la gestion de la ressource produits sur le territoire d'autre part a également été réalisée (Seguin et al., 2022).

Interactions littorales

L'observation de l'influence de la marée et des tempêtes sur des chroniques piézométriques montre qu'il est envisageable qu'une part des processus d'intrusion saline puisse être contrôlée par la circulation littorale en mer, la dynamique sédimentaire, l'énergie des vagues, le niveau d'eau à la côte, en particulier au droit des embouchures fluviales. Un dispositif de suivi haute-résolution granulométrique du transport solide a ainsi été installé sur la Têt, un des principaux fleuves s'écoulant sur la plaine en provenance des massifs pyrénéens (Meslard et al., 2022). Des corrélations significatives ont pu être observées entre dynamique de la houle et fluctuations piézométriques (en particulier pendant les épisodes de tempêtes), même pour des niveaux aquifères situés dans le Pliocène profond (profondeur > 100 m), avec des déphasages temporels variables, probablement liés aux propriétés hydrodynamiques de chaque niveau aquifère (Badillo, (2021), Caballero et al., (2022c), Lanini et al., (2022)). La situation future a également été explorée via une modélisation hydrodynamique couplée niveau-houle Telemac-Tomawac pour reproduire l'effet des forçages météo-océaniques sur la zone côtière (Proust, 2021).

Caractérisation hydrogéologique et modélisation

Des travaux de reconstitution de cartes piézométriques historiques et de bancarisation de l'ensemble des données quantitatives et qualitatives sur les ressources en eau souterraines du territoire et leurs caractéristiques hydrodynamiques ont permis de proposer un modèle conceptuel pour le fonctionnement de l'aquifère (Caballero et al., 2022b). Les cartes montrent que les niveaux piézométriques dans les formations du Quaternaire sont relativement stables, alors que pour les formations du Pliocène, on observe une importante baisse des niveaux, de l'ordre de 8 m en moyenne, entre 1960 et 2012. Elles montrent aussi que les flux de drainage verticale sont aujourd'hui orientés du Quaternaire vers le Pliocène à cause de l'exploitation du Pliocène, qui crée ainsi un risque de pollution par des eaux salées (ou affectées par des polluants) qui circulent dans les formations du Quaternaire. Les distributions spatiales des perméabilités et emmagasinement ont été modélisées et ont permis de produire des cartes des flux d'interaction avec les cours d'eau et aux limites du système. Des cartes de distribution spatiale de caractéristiques géochimiques des eaux du Quaternaire et du Pliocène ont également été produites et permettent de décrire l'évolution temporelle et spatiale des processus de contamination des eaux souterraines (intrusions salines et pollutions anthropiques).

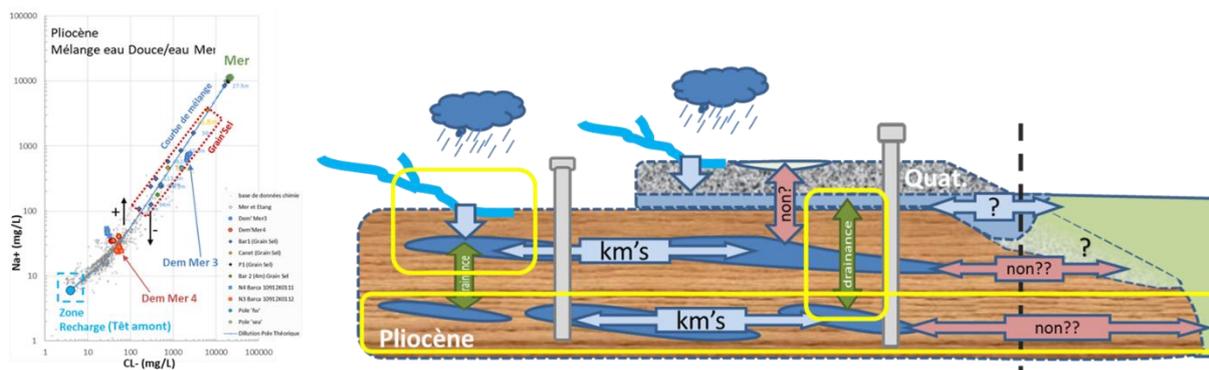


Figure 4 : Mise en évidence de l'influence de l'eau de mer et de l'eau de recharge sur la minéralisation des eaux souterraines (gauche) et modèle conceptuel du fonctionnement de l'aquifère Plio-Quaternaire du Roussillon.

L'analyse des données géochimiques ainsi bancarisées montre que l'ensemble des eaux souterraines échantillonnées dans les formations du Pliocène se placent le long d'une zone de mélange comprise entre deux pôles : l'eau de mer d'une part et l'eau douce apportée par les pluies ou les cours d'eau d'autre part (Figure 4 gauche).

L'ensemble de ces résultats ont permis de proposer un modèle conceptuel du comportement des eaux souterraines du territoire de la plaine du Roussillon (Figure 4 droite). Les interprétations des essais de pompage ont permis de montrer que les écoulements souterrains au sein du Pliocène sont contrôlés par la géométrie des dépôts sableux, avec des rabattements qui peuvent s'étendre latéralement sur des distances pluri-kilométriques, tel que schématisé sur la Figure 4. Par ailleurs, les essais ne montrent pas de relation hydraulique entre les formations du Pliocène et la mer ou les étangs lors des pompages dans le Pliocène, même en bordure littorale (Dewandel et al., 2022). On peut en conclure que les formations du Pliocène affleurantes bénéficient des apports des précipitations et des cours d'eau qui drainent les massifs environnants et des apports en provenance du Quaternaire qui les surmontent et que l'importance de ces flux est contrôlée par celle des pompages dans le Pliocène. La recharge des formations du Quaternaire est apportée par les précipitations et les cours d'eau, dont une partie du flux est dérivée par les réseaux de canaux d'irrigation dans le secteur amont de la plaine (Laurent et al., (2021) et Ladouche et Caballero, (2022)) ou bien directement vers les nappes à proximité du littoral. Ces concepts ont enfin été utilisés pour construire un modèle numérique hydrodynamique (appelé MartRouss) réalisé avec le logiciel de modélisation MARTHE du BRGM (Lanini et al., 2022). Le modèle calé en régime permanent confirme et quantifie l'origine des flux de recharge des formations Quaternaires et Pliocènes et ceux de drainance entre eux. Il propose également une quantification des sorties d'eau douce en mer à partir du Quaternaire et des entrées d'eau de mer en son sein et montre que, dans les conditions actuelles d'exploitation, les premières seraient supérieures aux secondes, ce qui traduirait un risque limité de salinisation de la ressource en eau contenue dans les formations Pliocènes.

Plateforme de valorisation Visi'Eau 66

Une plateforme numérique nommée [Visi'Eau 66](#) a été construite pour mettre à disposition l'ensemble des résultats du projet Dem'Eaux Roussillon d'une part et fournir un outil de gestion de la ressource en eau aux gestionnaires du territoire d'autre part. Cette plateforme numérique permet l'accès, la visualisation et le téléchargement de données sur les variables météorologiques, les eaux de surface et souterraines et des données produites dans le cadre du projet (Raynaud, 2022a et b). Elle vise à constituer un outil de partage de l'information sur l'état des ressources en eau, qui peut aussi être mobilisé pour le suivi opérationnel en temps réel et comme outil d'aide à la décision, dans le cadre des comités sécheresse par exemple.

Conclusions

Le projet Dem'Eaux Roussillon a permis de produire des avancées significatives de la connaissance sur le comportement des eaux souterraines de la plaine du Roussillon. L'ensemble des résultats sont présentés dans des rapports téléchargeables sur le [site du projet](#). Ils montrent l'intérêt de la mobilisation de compétences pluridisciplinaires pour décrire l'ensemble des facteurs qui contrôlent le comportement des eaux souterraines dans les aquifères côtiers. D'une manière générale et schématique, les résultats obtenus permettent de renseigner les gestionnaires sur les processus de recharge, d'écoulement et de minéralisation au sein des aquifères et montrent que l'amélioration des protocoles de gestion des aquifères côtiers passe par la poursuite et la densification des réseaux de surveillance, l'intégration du suivi de la minéralisation de l'eau en bordure côtière et en étendant le suivi géochimique à l'ensemble des éléments majeurs. Maintenir un bon niveau de remplissage des aquifères du Quaternaire, avec de l'eau de bonne qualité, pourrait enfin constituer une stratégie de gestion intéressante de la ressource en eau souterraine pour limiter le risque d'intrusion saline, tout en optimisant l'exploitation de la ressource en eau souterraine contenue dans les formations du Pliocène.

Références

- Badillo, M. (2021), Contrôle des forçages météo-marins sur l'hydrodynamique de l'aquifère côtier de la plaine du Roussillon (France). Modèle hydrodynamique marin. Rapport de stage Master 1, Génie Côtier et Développement raisonné du littoral, Université de Montpellier. 24 p.
- Bosio, C. Lavenus, R., (2021) – Evaluation des externalités et services associés à l'irrigation gravitaire. Production #10 du projet Dem'eaux Roussillon, BRGM/RP-71415-FR, 28 p., 1 ann.
- Caballero Y., Vigouroux P., Dewandel B., Pezard, P., (2022a) - Forages de Saint-Cyprien et Pollestres (66) - Dossier des Ouvrages Exécutés - Production #22a du projet Dem'Eaux Roussillon. BRGM/RP-70300-FR, 56 p., 39 ill., 8 ann.
- Caballero Y., Ladouche B., Dewandel B., (2022b) – Modèle conceptuel du comportement des eaux souterraines de l'aquifère Plio-Quaternaire de la plaine du Roussillon, de 1960 à nos jours. Production #23 du projet Dem'Eaux Roussillon, BRGM/RP- 71763 -FR, 111 p., 73 fig., 2 ann.,(48 fig)
- Caballero, Y., Balouin, Y., Baudouy, L., Berne, S., Bouchette, F., Bourguine, B., Bourrin, F., Brun, L., Champollion, C., Duvail, C., Dall'Alba, V., Dewandel, B., Fioravanti, A., Garin, P., Henry, G., Issautier, B., Jacob, T., Ladouche, B., Lanini, S., Lasseur, E., Loffi, J., Loiselet, C., Mauffrey, M.-A., Meslard, F., Montginoul, M., Neverre, N., Pezard, P., Raynaud, J.-B., Renard, P., Rinaudo, J.-D., Schorpp, L., Seguin, L., Soullignac, A., (2022c), Caractérisation transdisciplinaire d'un aquifère côtier complexe, pour une exploitation maîtrisée et durable de sa ressource en eau en contexte méditerranéen : Le Projet Dem'Eaux Roussillon. Rapport final. BRGM/RP-71814-FR, 81 p., 62 ill., 1 ann.
- Chauveau, M., Bosio, C., Digaud, R. (2021) – Analyse détaillée de l'usage irrigation sur la plaine du Roussillon. Production #9 du projet Dem'Eaux Roussillon, RP-71476-FR, 104 p., 49 fig., 1 ann.
- Dall'Alba, V., Renard, P., Straubhaar, J., Issautier, B., Duvail, C., and Caballero, Y. (2020): 3D multiple-point statistics simulations of the Roussillon Continental Pliocene aquifer using DeeSse, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 4997–5013, <https://doi.org/10.5194/hess-24-4997-2020>
- Dewandel B., Ladouche B., Caballero Y. (2022) – Synthèse et valorisation des données d'essai par pompage réalisés sur les sites Dem'Mer et Dem'Ter dans le cadre du projet Dem'Eaux Roussillon. Production #22b du projet Dem'Eaux Roussillon. BRGM/RP-71514-FR, 99 p., 72 fig., 3 ann.
- Duvail C. (2008). Expression des facteurs régionaux et locaux dans l'enregistrement sédimentaire d'une marge passive. Exemple de la marge du Golfe du Lion, étudiée selon un continuum terre-mer. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 2, 296p.
- Duvail, C., Bauduy, L., Fioravanti, A., (2021) – Synthèse géologique des forages Dem'Mer et Dem'Ter Roussillon (Pyrénées-Orientales), Production #4 du projet Dem'Eaux Roussillon, Fugro Document No.: GTR/BRGM/0620-1836, BRGM/RP-71472-FR, 22 p. 4 ann.
- Duvail C., Berné S., Champollion C., Delahaie S., Issautier B., Jacob Th., Laouenan S., Lasseur E., Mauffrey M.-A. (2022) – Corrélation géologique terre-mer. Production #5 du projet Dem'Eaux Roussillon. Rapport BRGM/RP-71769-FR, 78 pp., 32 fig, 2 annexes.
- Fioravanti A., Bourguine, B., Loiselet, C. Caballero, Y., (2022) – Modélisation géologique 3D de la plaine du Roussillon. Production #6 du projet Dem'Eaux Roussillon, BRGM/RP-71572-FR, 39 p., 29 fig., 3 tabl., 2 ann.
- Issautier, B., Duvail, C., Briais, J., Lasseur, E (2021) – Caractérisation géologique du Pliocène de la Plaine du Roussillon : synthèse de la tâche « terrain ». Production #3 du projet Dem'Eaux Roussillon, Rapport final. BRGM/RP-69896-FR, 73 p., 65 fig
- Ladouche B., Caballero, Y (2022) – Echanges et flux d'eau entre canaux d'irrigation, cours d'eau et nappes d'eau souterraine du bassin versant de la Têt en amont de Perpignan. Production #11b du projet Dem'Eaux Roussillon, Rapport final. BRGM/RP-71486-FR, 37 p., ill., 15 fig., 2 tabl., 1 ann (18 figs.).
- Lanini S., Schorpp L. et Dall'Alba V. (2022) – Modélisation des écoulements souterrains dans la plaine du Roussillon : modèle MartROUSS. Production #24 du projet Dem'Eaux Roussillon. BRGM/RP-71764-FR, 52 p., 46 fig., 5 ann.,
- Laurent, S., Chauveau, M., Digaud, R. (2021) – Campagne de mesure des débits sur la Têt et conclusions sur les flux de surface et souterrains. Production #11a du projet Dem'Eaux Roussillon, BRGM/RP-71406-FR, 64 p., 37 fig., 1 tabl
- Meslard, F., Bourrin, F., Pinel, S., Ludwig, W., Sadaoui, M. (2022) – Interactions des forçages fluvio-marins à l'interface Terre-Mer. Production P#18/#19 du projet Dem'Eaux Roussillon, Rapport RP-71537-FR ; 50 p., 32 fig., 3 tabl., 1 ann.
- Montginoul M. (2022) – Développement d'un outil informatique permettant de caractériser les consommations d'eau à partir des fichiers de facturation. Production #12 du projet Dem'Eaux Roussillon, RP-71526-FR, 39 p., 44 illustrations, 2 annexes.
- Neverre N., Mathey A. (2022), Modèle d'optimisation de l'approvisionnement en eau potable de la Plaine du Roussillon par rapport aux ressources disponibles. Production #15 du projet Dem'Eaux Roussillon, BRGM/RP-71532-FR, 39 p., 15 fig., 6 tabl., 2 ann.
- Proust N. (2021), Modélisation actuelle/future du littoral. Production #20 du projet Dem'Eaux Roussillon. Rapport RP-71538-FR, 22p., 23 fig. 2 tab.
- Raynaud, J.-B. (2022a), La plateforme Follow Roussillon, Infrastructure matérielle et réseau. Production #26 du projet Dem'Eaux Roussillon. Rapport RP-71785-FR, 31p.
- Raynaud, J.-B. (2022b), La plateforme Follow Roussillon, Outil de valorisation et de gestion. Production #27 du projet Dem'Eaux Roussillon. Rapport RP-71786-FR, 15p., 16 fig.
- Seguin L., Petit A., Garin P., Chazot S., Caballero Y., (2022) – Intégration des connaissances scientifiques et techniques dans les processus de planification territoriale de gestion de l'eau. Production #8/#16 du projet Dem'Eaux Roussillon, Rapport RP-71465-FR, 75 p., 3 fig., 2 tabl., 3 ann.
- Soullignac A., J Collignan et Neverre N. (2022) – Prototype d'outil de prévision de la demande en eau potable intégrant les incertitudes. Production #13 du projet Dem'Eaux Roussillon, BRGM/RP-71391-FR, 29 p., 9 fig., 6 tab.