

# Projet Grain d'Sel - Compte-rendu de fin de projet

Nathalie Dörfliger

▶ **To cite this version:**

Nathalie Dörfliger. Projet Grain d'Sel - Compte-rendu de fin de projet. 2014. hal-01226841

**HAL Id: hal-01226841**
**https://brgm.hal.science/hal-01226841**

Submitted on 10 Nov 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Compte-rendu de fin de projet

**Projet ANR-09-ECOT-008-01**

**Projet GRAIN D'SEL**

**ANR-09-ECOTECH**


A IDENTIFICATION ..... 2
B RESUME CONSOLIDE PUBLIC ..... 2
B.1 Résumé consolidé public en français ..... 2
B.2 Résumé consolidé public en anglais ..... 5
C MEMOIRE SCIENTIFIQUE ..... 7
C.1 Résumé du mémoire ..... 7
C.2 Enjeux et problématique, état de l'art ..... 9
C.3 Approche scientifique et technique ..... 10
C.4 Résultats obtenus ..... 11
C.5 Exploitation des résultats ..... 14
C.6 Discussion ..... 15
C.7 Conclusions ..... 16
C.8 Références ..... 17
D LISTE DES LIVRABLES ..... 17
E IMPACT DU PROJET ..... 19
E.1 Indicateurs d'impact ..... 19
E.2 Liste des éléments de valorisation ..... 21
E.3 Impact au niveau des partenaires industriels ..... 21
E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) ..... 23

# A IDENTIFICATION

| | |
|---|---|
| Acronyme du projet | **GRAIN D'SEL** |
| Titre du projet | Nouvelles approches et capteurs innovants pour la connaissance et le suivi des aquifères côtiers. Application à la surveillance des intrusions salines dans le bassin sédimentaire du Roussillon (France) |
| Coordinateur du projet (société/organisme) | BRGM<br>Nathalie Dörfliger, Direction Eau, Environnement & Ecotechnologies |
| Période du projet (date de début – date de fin) | 25 février 2010<br>24 février 2014 |
| Site web du projet, le cas échéant | www.graindsel-anr.fr |

| Rédacteur de ce rapport | |
|---|---|
| Civilité, prénom, nom | Mme Nathalie DÖRFLIGER |
| Téléphone | 02 38 64 48 71 |
| Adresse électronique | n.dorfliger@brgm.fr |
| Date de rédaction | 25 avril 2014 |

| | |
|---|---|
| Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique) | Burgeap R&D Jean Marie Côme ; Géosciences CNRS Montpellier II Philippe Pezard, CEFREM Université Perpignan Raphaël Certain, Imageau Denis Neyens. |

# B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

## B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

### Nouvelles approches pour le suivi des intrusions salines des aquifères côtiers

Lieu de développement économique, les zones côtières ainsi que les aquifères associés sont fragiles et sujets à des intrusions salines. Une étude systémique des aquifères côtiers avec l'acquisition de données hydro-géophysiques multi-échelles permet de développer des systèmes de gestion adaptés.

### Approche systémique multi-échelle de caractérisation des intrusions salines en aquifères côtiers sédimentaires hétérogènes – application à la plaine du Roussillon.

Lieux de développement économique et démographique intense, les zones côtières représentent des environnements fragiles à de nombreux égards, dont ceux concernant les intrusions salines au sein des aquifères côtiers. Le fonctionnement et l'extension du biseau salé sont fonction de la géométrie, de la lithologie et de leurs propriétés hydrodynamiques ainsi que des conditions d'exploitation. Le phénomène peut être local et variable dans le temps, voire plus régional. En l'absence de gestion et de suivi adéquats, ce phénomène peut avoir des conséquences environnementales et économiques importantes. La plaine du Roussillon constitue un exemple représentatif des aquifères côtiers sédimentaires hétérogènes pour lequel de nombreuses données géo-référencées existent, notamment des données géophysiques aéroportées (EUFAR, 2008).

Classiquement des mesures directes ponctuelles de salinité permettent d'identifier mais non d'anticiper les risques sur les ressources en eaux souterraines du milieu littoral. Seule une approche systémique de connaissance des aquifères côtiers peut permettre de développer des systèmes de gestion et d'alerte. Dans le cadre du projet GRAIN D'SEL de nouvelles approches pour la connaissance, la métrologie et la gestion des aquifères côtiers à différentes échelles ont été développées: (i) échelle régionale avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées (électromagnétiques) et (ii) échelle locale ensuite, avec l'acquisition de données hydro-géophysiques en continu en forage, et de données hydrogéochimiques (dont isotopiques), afin de répondre aux questions suivantes :

- Quelle localisation et extension des intrusions salines ?
- Quelle rôle des formations peu perméables au sein des aquifères sur la diffusion de l'eau salée depuis la mer et entre les aquifères ?

### Caractérisation hydro-géophysique à l'échelle régionale (aéroportée) et locale à l'aide d'un SMD (© Imageau) en forage

**A l'échelle régionale**, avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées électromagnétiques acquises dans le cadre du projet européen EUFAR en 2008 [zone de 40 km x 10 km, avec des lignes N-S espacées de 100m], ces mesures permettent de mesurer la réponse du sous-sol à un signal magnétique transmis par une bobine d'induction en termes e résistivité électrique. La réponse dans les hautes fréquences est essentiellement influencée par la résistivité des structures proches de la surface, alors que les fréquences plus faibles permettent d'investiguer les structures en profondeur. La réponse est influencée par la porosité, la saturation en eau, la salinité de l'eau ainsi que la présence des argiles. Dans le cadre de la zone d'étude caractérisée par des faibles résistivités liées à la présence de matériel argilo-silteux et d'eau de salinité différente, la profondeur de pénétration est inférieure à 100m.

A l'**échelle locale**, avec l'acquisition de données hydro-géophysiques sur des observatoires en forage au Barcarès (forages de 150m de profondeur) et à Canet (forages de 20m de profondeur) : (1) mesures de la conductivité électrique de l'aquifère et de salinité de l'eau déduite en continu (avec un pas de temps de 2 ou 3h) par un système de dipôle-dipôle, composé d'électrodes de cuivre disposées selon un espacement régulier sur une flûte ou un tube en PVC inséré dans le forage (système SMD Imageau ©) et (2) suivi de pression entre obturateurs (système Westbay, Schlumberger) avec prise d'échantillons d'eau. L'utilisation couplée de ces différentes approches constitue une réelle innovation en matière de système d'instrumentation intégrée pour l'étude in situ de la dynamique des aquifères soumis à des intrusions salines. Des essais hydrauliques ainsi qu'une caractérisation géochimique des eaux prélevées sur le Westbay et l'interprétation des données ont permis d'établir un modèle conceptuel, utilisé pour la modélisation hydrodynamique des phénomènes observés.

### Principaux résultats du projet

A l'échelle régionale, l'interprétation des données géophysiques aéroportées a mise en évidence des zones de salinité différente et différentié des structures en grand cohérente, alors qu'une identification fine des intrusions salines sur un plan vertical est difficile au vu du contexte sédimentaire. A l'échelle locale, les observatoires hydrogéophysiques qui ont fait l'objet de raffinement technologique dans le cadre du projet ont permis d'obtenir des données de salinité de qualité et d'identifier plusieurs unités hydrogéologiques à partir des critères hydrodynamiques, hydrophysiques et hydrogéochimiques, pour lesquelles les

échanges verticaux sont peu importants contrairement à ce qui était attendu. Les observations ont pu être reproduites à l'aide d'un modèle hydrodynamique sur une coupe étang- mer, malgré la complexité du milieu. Les résultats montrent l'apport des observatoires pour imager sur le long terme des variations de salinité selon différentes fréquences, par rapport à d'autres techniques plus coûteuses.

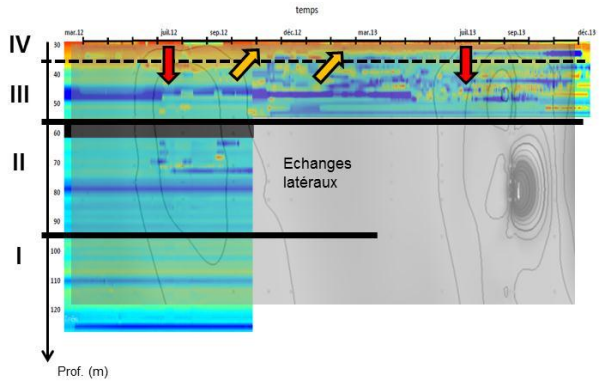
## Perspectives

Au vu de la complexité des milieux aquifères détritiques issus de la mise en place par des prismes progradants subsidents de granulométrie différente avec des corps sableux plurimétriques, il est nécessaire de poursuivre des travaux de recherche concernant la caractérisation de l'hétérogénéité du point de vue sédimentologique et hydrogéologique par des approches géostatistiques voire génétiques et de poursuivre le suivi des paramètres au niveau des observatoires SMD en y ajoutant des capteurs de pression, afin de pouvoir disposer sur un seul forage d'informations nécessaires à la modélisation des phénomènes et à la définition de seuils d'alerte. Ce type d'amélioration représenterait une innovation économique. Ces observatoires SMD peuvent être utilisés dans le cadre de suivi d'aquifères côtiers pour lesquels les intrusions salines sont un enjeu, en sélectionnant selon une approche multi-échelle les sites à suivre en priorité. Les observatoires du projet font l'objet d'un suivi après le projet et pourront être utilisés et valorisés dans le cadre de projets de recherche ou de démonstrateurs tels que proposés dans le cadre du prochain CPER Languedoc Roussillon.

## Production scientifique depuis le début du projet

La production scientifique comprend quatre communications à congrès concernant l'interprétation de la géophysique aéroportée (Vienne, 2011), la démarche systémique multi-échelle (France, 2012), l'interprétation des données hydrogéophysiques et géochimiques au niveau local (Australie, 2013) et l'interprétation des données géochimiques et isotopiques (France, 2013) avec publication dans *Procedia Earth and Planetary Science* pour ce dernier, un chapitre de livre (Collection Mer et Océan, Vol 1 - Système océanique : complexité, valorisant les connaissances acquises dans le cadre du projet. Deux articles sont en préparation sur les observatoires (hydrogéophysiques et hydrochimie).

## Illustration




*Données hydrogéophysiques du SMD (© ImaGeau) et du champ des pressions hydrauliques avec une représentation des 4 unités hydrogéologiques et la direction des flux.*

## Informations factuelles

Le projet ANR GRAIN D'SEL est un projet collaboratif public privé, concernant le développement expérimental sur site avec la mise au point d'un prototype d'observatoires hydrogéophysiques à l'échelle local pour le suivi et la caractérisation des intrusions salines en aquifères détritiques côtiers. Le projet a été

coordonné par le BRGM ; il associe deux partenaires académiques avec Géosciences Montpellier (CNRS, Université de Montpellier II) et le CEFREM (Université de Perpignan et CNRS) et deux partenaires industriels : Burgeap R&D et la PME ImaGeau. Le projet a débuté en février 2010, pour une durée de 48 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 862 576 € pour un coût global de 1944 256 €.

## B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

### New methodology for the monitoring of salt water intrusion in coastal aquifers

Setting of economic development, coastal zones as well as linked aquifers are sensitive to salt water intrusions. A systemic study of coastal aquifers integrating acquisition of multi scale hydro geophysics data allows developing adapted water management systems.

#### Multi-scale systemic approach of salt water intrusion characterization within coastal detrital heterogeneous aquifers – Roussillon test site

Places of intense economic and demographic development, coastal areas are fragile environments in many respects, including those relating to salt water intrusion in coastal aquifers. Operation and extension of salt wedge depends on the geometry, lithology and their hydrodynamic properties and water abstraction conditions. The phenomenon can be local and variable in time or more regional. In the absence of proper management and monitoring, this can have significant environmental and economic consequences. The Roussillon plain is a representative example of coastal detrital aquifers for which many geo referenced data sets exist, including airborne geophysical data (EUFAR, 2008).

Classically occasional direct measures of salinity identify but do not allow anticipating risks on groundwater resources in coastal environment. Only a systematic approach to understand coastal aquifers may help development of management and warning systems. Under the GRAIN D'SEL project, new approaches for knowledge, metrology and management of coastal aquifers at various scales were developed: i) at regional scale with the interpretation of electromagnetic airborne geophysics and ii) locally then, with the acquisition of hydro-geophysical data continuously in bore wells and hydrogeochemical data (including isotopic) in order to answer to the following questions:

- What location and extension of saline intrusions?
- What role of low permeable layers within aquifers on the salt water advection and diffusion from the sea and between aquifers?

#### Hydro-geophysical characterization at regional scale (airborne) and locally based on a SMD (© ImaGeau) in bore wells

**A the regional level,** with the use of electromagnetic airborne geophysical data acquired in the framework of the European project EUFAR in 2008 [area 40 km x 10 km, with NS lines spaced of 100m], these measures are used to identify the response of subsurface to a signal transmitted by a magnetic induction coil in terms of electrical resistivity. The response at high frequencies is essentially influenced by the resistivity of the near surface structures, whereas lower frequencies are used to investigate the deep structures. The response is influenced by the porosity, water saturation, water salinity and clays presence. As part of the study area is characterized by low resistivity due to the presence of clay and silt material and water of different salinity, depth of penetration is less than 100 m.

**At the local level**, with the acquisition of hydro-geophysical observatories in Barcares bore wells (150m depth) and Canet (20 m depth): 1) measures of the electrical conductivity of the aquifer and of the water salinity derived continuously (with a time step of 2 or 3 hours) by a

dipole dipole system, consisting of copper electrodes disposed at a regular spacing on a flute or PVC tubing inserted into a bore well (SMD ImaGeau ©) and 2) monitoring pressure between packers (Westbay system, Schlumberger ©) with water sampling. The combined use of these various approaches is a real innovation in term of integrated device for in situ study of dynamics of aquifers subject to saline intrusion. Hydraulic tests and geochemical characterization of water samples on the Westbay, and interpretation of data allowed developing a conceptual model used for hydrodynamic modeling of the observed phenomena.

## Major results of the project

At the regional level, the interpretation of airborne geophysical data has highlighted areas of different salinity and differentiated large coherent structures, while a fine saline intrusion detection on a vertical plane remains difficult given the sedimentary context. At the local level, hydrogeophysical observatories have been technologically improved and allowed to collect salinity data of quality and to identify several hydrogeological units based on the hydrodynamic, hydro geophysical and hydrogeochemical data, for which the vertical exchanges are insignificant contrary to what was expected. The observations could be reproduced using a hydrodynamic model on a cross section from lagoon to sea, despite the complexity of the subsurface. The results show the contribution of such observatories for imaging in the long terms variations in salinity by different frequency compared to other more costly techniques.

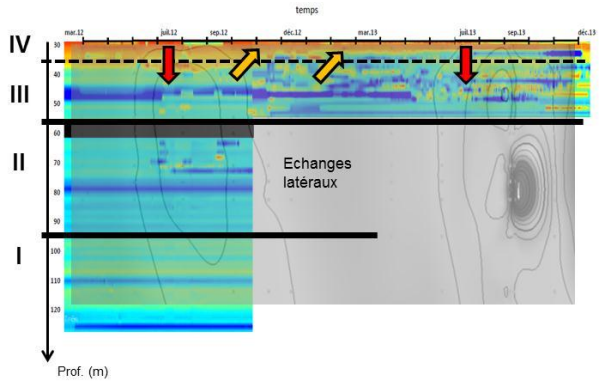
## Prospect

Given the complexity of detrital aquifer media resulting of the implementation of prograding and subsiding prisms of various granulometry and including plurimetric sand bodies, it is necessary to keep on research on the characterization of the heterogeneity of the sedimentology and hydrogeological point of view through geostatistical or genetic approaches and to keep on the development of the SMD device for observatories including pressure sensors, in order to have on a single bore well needed data for modeling phenomena and to define warning thresholds. Such technological improvements would be an economic innovation. These SMD observatories can be used in the monitoring of coastal aquifers where saline intrusion is an issue, in selecting priority sites following a multi scale approach. Observatories of the project are monitored after the end of the project and may be used and valued as part of research projects and demonstrators as proposed in the next CPER of Languedoc Roussillon.

## Scientific production since the beginning of the project

Scientific production includes four conference papers concerning the interpretation of airborne geophysics (Vienna, 2011), systemic and multi-scale approach (Cassis, 2012), the interpretation of geochemical and hydro geophysical data from observatories (Perth, 2013) and the interpretation of geochemical and isotopic data (Avignon, 2013) with the publication in *Procedia Earth and Planetary Science* for the latter, a book chapter (Sea and Ocean Collection, Vol 1, Ocean system! Complexity) valuing the knowledge acquired in the project. Two articles on hydrogeophysical observatories are in preparation (hydrogeophysical and hydrochemistry).

## Illustration




*Hydrogeophysical data from SMD (© ImaGeau) and groundwater head graphs with four hydrogeological units and flux directions.*

## Facts and key figures

The ANR GRAIN D'SEL project is a public-private collaborative project on experimental development on site with the test and improvement of hydrogeophysical observatories at the local level for monitoring and characterization of saline intrusion in bore wells within detrital coastal aquifers. The project was coordinated by the BRGM; it gathered two academic partners with Geosciences Montpellier (CNRS, University of Montpellier II) and CEFREM (University of Perpignan and CNRS) and two industrial partners: Burgeap R&D and ImaGeau SME. The project started in February 2010 for a period of 48 months. The financial support from the ANR is 862 576 € for a total cost of 1 944 256 €.

# C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

***Mémoire scientifique confidentiel*** : non

## C.1 RESUME DU MEMOIRE

Lieux de développement économique et démographique intense, les zones côtières représentent des environnements fragiles à de nombreux égards, dont ceux concernant les intrusions salines au sein des aquifères côtiers. Le fonctionnement et l'extension du biseau salé sont fonction de la géométrie, de la lithologie et de leurs propriétés hydrodynamiques ainsi que des conditions d'exploitation. Le phénomène peut être local et variable dans le temps, voire plus régional. En l'absence de gestion et de suivi adéquats, ce phénomène peut avoir des conséquences environnementales et économiques importantes. La plaine du Roussillon constitue un exemple représentatif des aquifères côtiers sédimentaires hétérogènes pour lequel de nombreuses données géo-référencées existent, notamment des données géophysiques aéroportées (EUFAR, 2008). Classiquement des mesures directes ponctuelles de salinité permettent d'identifier mais non d'anticiper les risques sur les ressources en eaux souterraines du milieu littoral. Seule une approche systémique de connaissance des aquifères côtiers peut permettre de développer des systèmes de gestion et d'alerte. Dans le cadre du projet GRAIN D'SEL de nouvelles approches pour la connaissance, la métrologie et la gestion des aquifères côtiers à différentes échelles ont été développées: (i) échelle régionale avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées (électromagnétiques) et (ii) échelle locale ensuite, avec l'acquisition de données hydro-géophysiques en continu en forage, et de données hydrogéochimiques (dont isotopiques), afin de répondre aux questions suivantes :

- Quelle localisation et extension des intrusions salines ?
- Quelle rôle des formations peu perméables au sein des aquifères sur la diffusion de l'eau salée depuis la mer et entre les aquifères ?

**Caractérisation hydro-géophysique à l'échelle régionale (aéroportée) et locale à l'aide d'un SMD (© Imageau) en forage**

**A l'échelle régionale**, avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées électromagnétiques acquises dans le cadre du projet européen EUFAR en 2008, ces mesures permettent de mesurer la réponse du sous-sol à un signal magnétique transmis par une bobine d'induction en termes e résistivité électrique. La réponse dans les hautes fréquences est essentiellement influencée par la résistivité des structures proches de la surface, alors que les fréquences plus faibles permettent d'investiguer les structures en profondeur. La réponse est influencée par la porosité, la saturation en eau, la salinité de l'eau ainsi que la présence des argiles. Dans le cadre de la zone d'étude caractérisée par des faibles résistivités liées à la présence de matériel argilo-silteux et d'eau de salinité différente, la profondeur de pénétration est inférieure à 100m.

**A l'échelle locale**, avec l'acquisition de données hydro-géophysiques sur des observatoires en forage au Barcarès (forages de 150m de profondeur) et à Canet (forages de 20m de profondeur) : (1) mesures de la conductivité électrique de l'aquifère et de salinité de l'eau déduite en continu (avec un pas de temps de 2 ou 3h) par un système de dipôle-dipôle, composé d'électrodes de cuivre disposées selon un espacement régulier sur une flûte ou un tube en PVC inséré dans le forage (système SMD Imageau ©) et (2) suivi de pression entre obturateurs (système Westbay, Schlumberger) avec prise d'échantillons d'eau. L'utilisation couplée de ces différentes approches constitue une réelle innovation en matière de système d'instrumentation intégrée pour l'étude in situ de la dynamique des aquifères soumis à des intrusions salines. Des essais hydrauliques ainsi qu'une caractérisation géochimique des eaux prélevées sur le Westbay et l'interprétation des données ont permis d'établir un modèle conceptuel, utilisé pour la modélisation hydrodynamique des phénomènes observés.

## Principaux résultats du projet

A l'échelle régionale, l'interprétation des données géophysiques aéroportées a mise en évidence des zones de salinité différente et différentié des structures en grand cohérente, alors qu'une identification fine des intrusions salines sur un plan vertical est difficile au vu du contexte sédimentaire. A l'échelle locale, les observatoires hydrogéophysiques qui ont fait l'objet de raffinement technologique dans le cadre du projet ont permis d'obtenir des données de salinité de qualité et d'identifier plusieurs unités hydrogéologiques à partir des critères hydrodynamiques, hydrophysiques et hydrogéochimiques, pour lesquelles les échanges verticaux sont peu importants contrairement à ce qui était attendu. Les observations ont pu être reproduites à l'aide d'un modèle hydrodynamique sur une coupe étang- mer, malgré la complexité du milieu. Les résultats montrent l'apport des observatoires pour imager sur le long terme des variations de salinité selon différentes fréquences, par rapport à d'autres techniques plus coûteuses.

## Perspectives

Au vu de la complexité des milieux aquifères détritiques issus de la mise en place par des prismes progradants subsidents de granulométrie différente avec des corps sableux plurimétriques, il est nécessaire de poursuivre des travaux de recherche concernant la caractérisation de l'hétérogénéité du point de vue sédimentologique et hydrogéologique par

des approches géostatistiques voire génétiques et de poursuivre le suivi des paramètres au niveau des observatoires SMD en y ajoutant des capteurs de pression, afin de pouvoir disposer sur un seul forage d'informations nécessaires à la modélisation des phénomènes et à la définition de seuils d'alerte. Ce type d'amélioration représenterait une innovation économique. Ces observatoires SMD peuvent être utilisés dans le cadre de suivi d'aquifères côtiers pour lesquels les intrusions salines sont un enjeu, en sélectionnant selon une approche multi-échelle les sites à suivre en priorité. Les observatoires du projet font l'objet d'un suivi après le projet et pourront être utilisés et valorisés dans le cadre de projets de recherche ou de démonstrateurs tels que proposés dans le cadre du prochain CPER Languedoc Roussillon.

## C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Lieux de développement économique et démographique intense, les zones côtières représentent des environnements fragiles à de nombreux égards, dont ceux concernant les intrusions salines au sein des aquifères côtiers. Le fonctionnement et l'extension du biseau salé sont fonction de la géométrie, de la lithologie et de leurs propriétés hydrodynamiques ainsi que des conditions d'exploitation. Le phénomène peut être local et variable dans le temps, voire plus régional. En l'absence de gestion et de suivi adéquats, ce phénomène peut avoir des conséquences environnementales et économiques importantes.

L'intrusion saline des aquifères par les eaux de mer constitue l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus, qui impacte la qualité des eaux souterraines des aquifères côtiers, à l'échelle globale et européenne (Custodio, 2010). Ce phénomène naturel lié à la mise en contact des formations aquifères avec la mer, constituant une condition limite des aquifères côtiers avec des écoulements en direction de la mer peut être accentué par l'exploitation des aquifères par pompage. Ce phénomène entraîne des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau, mais également compromettre son aptitude à l'irrigation. Cette problématique se trouve aggravée par une concentration de la population sur les côtes (environ 70% de la population mondiale vit en zone littorale), et par une forte croissance démographique. Les activités humaines concentrées sur ces zones (industries, agriculture, tourisme…) provoquent une augmentation de l'exploitation de la ressource et favorisent une hausse du taux de salinisation (Jones et al., *1999*). Plusieurs types d'aquifères existent, des aquifères sédimentaires détritiques (alluviaux, au niveau des deltas, de bassin sédimentaire), des aquifères carbonatés potentiellement karstiques et des aquifères de socle (milieu fissuré) au sens large (granite, formations métamorphiques, formations volcaniques). Tous ces aquifères peuvent constituer des aquifères côtiers. Dans le cadre du projet Grain d'sel, seuls les aquifères côtiers sédimentaires détritiques de type bassin sédimentaire ont été étudiés, à partir des aquifères de la Plaine du Roussillon.

La plaine du Roussillon constitue un exemple représentatif des aquifères côtiers sédimentaires hétérogènes pour lequel de nombreuses données géo-référencées existent (Aunay 2007, Duvail 2008), notamment des données géophysiques aéroportées (EUFAR, 2008). Classiquement des mesures directes ponctuelles de salinité permettent d'identifier mais non d'anticiper les risques sur les ressources en eaux souterraines du milieu littoral. Seule une approche systémique de connaissance des aquifères côtiers peut permettre de développer des systèmes de gestion et d'alerte. Dans le cadre du projet GRAIN D'SEL de nouvelles approches pour la connaissance, la métrologie et la gestion des aquifères côtiers à différentes échelles ont été développées: (i) échelle régionale avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées (électromagnétiques) et (ii) échelle locale ensuite, avec

l'acquisition de données hydro-géophysiques en continu en forage, et de données hydrogéochimiques (dont isotopiques), afin de répondre aux questions suivantes :

- **Quelle localisation et extension des intrusions salines ?**
- **Quelle rôle des formations peu perméables au sein des aquifères sur la diffusion de l'eau salée depuis la mer et entre les aquifères ?**

Pour atteindre ces objectifs, le projet associe un partenaire industriel spécialisé dans le développement de systèmes autonomes innovants de surveillance à long terme du sous-sol (imaGeau), un partenaire industriel spécialisé dans le domaine de l'environnement, de l'ingénierie et plus particulièrement de la modélisation numérique des eaux souterraines (BURGEAP), une équipe de recherche dédiée à la dynamique des environnements côtiers (UPVD/IMAGES), une équipe de recherche spécialisée dans les mesures de géophysique et d'hydrodynamique en forage (Géosciences Montpellier, équipe Subsurface), et enfin une équipe de recherche du BRGM plus appliquée en hydrogéologie des aquifères complexes, et en outils de caractérisation innovants du sous-sol (géophysique aéroportée, hydrogéochimie, etc.). GRAIN D'SEL se situe donc dans un cadre de **recherche industrielle** en partenariat.

## C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Dans le cadre du projet ANR GRAIN D'SEL de nouvelles approches pour la connaissance, la métrologie et la gestion des aquifères côtiers sensibles aux intrusions salines, et ceci à différentes échelles ont été développées (**Figure 1**):

- **échelle régionale**, avec l'exploitation de données géophysiques aéroportées acquises dans le cadre du projet européen EUFAR en 2008 [zone de 40 km x 10 km, avec des lignes N-S espacées de 100m]. La géophysique aéroportée de type électromagnétisme est une méthode largement utilisée dans le domaine de la prospection minière. Dans le domaine fréquentiel, elle permet de mesurer la réponse du sous-sol à un signal magnétique transmis par une bobine d'induction. Le récepteur fixé au niveau de l'avion qui vole à une altitude constante de 50m au-dessus du sol mesure le champ magnétique secondaire. La réponse dans les hautes fréquences est essentiellement influencée par la résistivité des structures proches de la surface, alors que les fréquences plus faibles permettent d'investiguer les structures en profondeur. La méthode électromagnétique aéroportée est caractérisée par une bonne résolution pour les structures proches de la surface. Elle est sensible à la résistivité et à la susceptibilité magnétique, lesquelles sont influencées par la porosité, la saturation en eau, la salinité des fluides dans les pores ainsi que la présence des argiles. L'utilisation de la méthode électromagnétique multifréquence est essentiellement utilisée pour cartographier en 2D et 3D la résistivité du sous-sol à des profondeurs comprises entre 0 et 150 m. Dans le cadre de la zone d'étude caractérisée par des fortes conductivités liées à la présence de matériel argilo-silteux et d'eau de salinité différente, la profondeur de pénétration est inférieure à 100m.
- **échelle locale**, avec l'acquisition de données hydro-géophysiques sur des observatoires en forage au Barcarès (forages de 150m de profondeur) et à Canet (forages de 20m de profondeur) : (1) mesures de la conductivité électrique de l'aquifère et de salinité de l'eau déduite en continu (avec un pas de temps de 2 ou 3h) par un système de dipôle-dipôle, composé d'électrodes de cuivre disposées selon un espacement régulier sur une flûte ou un tube en PVC inséré dans le forage et (2) suivi de pression entre obturateurs (système Westbay, Schlumberger) avec prise d'échantillons de fluide. L'utilisation couplée de ces

différentes approches constitue une réelle innovation en matière de système d'instrumentation intégrée pour l'étude in situ de la dynamique des aquifères.

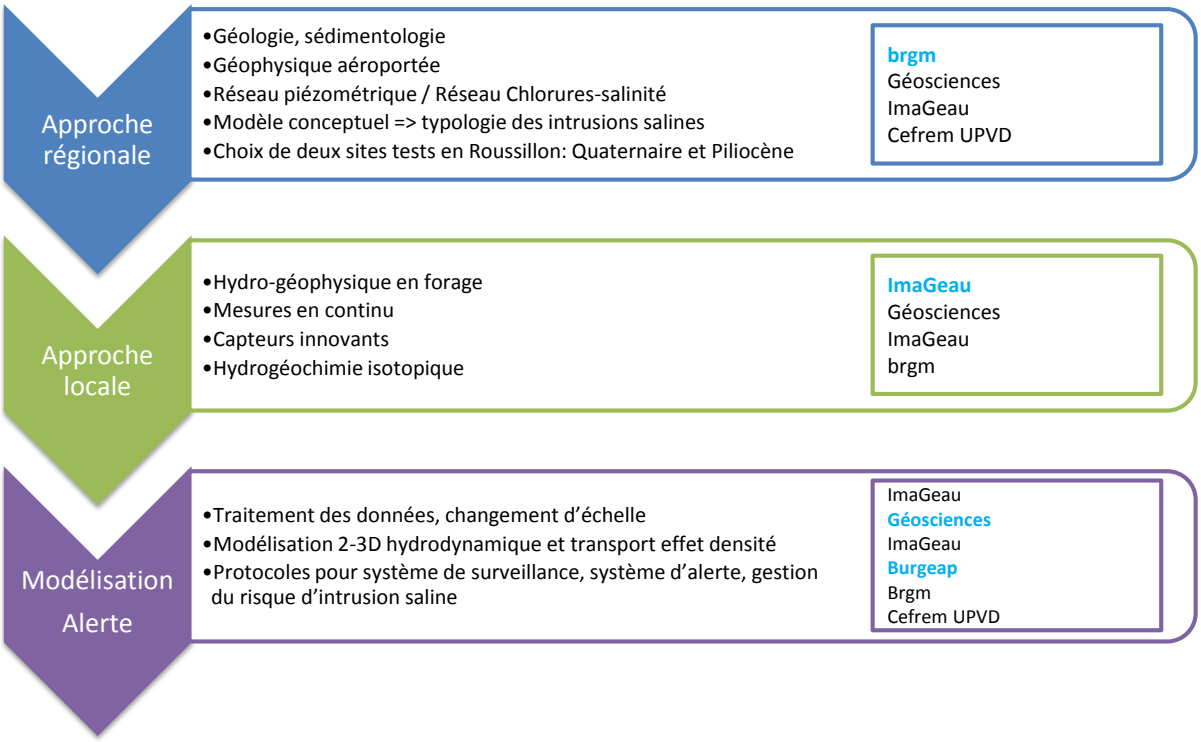



FIGURE 1 : PRESENTATION DE L'APPROCHE SYSTEMIQUE DU PROJET ANR GRAIN D'SEL

## C.4 RESULTATS OBTENUS

Les principaux résultats à **l'échelle régionale** concernent d'une part l'interprétation des données de géophysique aéroportée électromagnétique et d'autre part une synthèse concernant la typologie des aquifères littoraux en contexte sédimentaire détritique, qui à l'échelle de la plaine du Roussillon ont permis de localiser les deux sites pour l'étude à l'échelle locale (**Délivrable D1**). Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit :

- Les cartes de résistivité apparente pour les deux bornes de fréquence (0,9 kHz et 25 kHz) montrent de faibles résistivités (< 0.5 ohm.m) pour la mer Méditerranée et les eaux des lagunes, ce qui est cohérent avec les valeurs de la littérature (0.18 à 0.5 ohm.m). La carte 25kHz décrivant les formations situées à des profondeurs de l'ordre de 10m, indique une résistivité apparente d'environ 10 ohm.m pour les cordons du littoral. Dans la partie septentrionale, les calcaires des Corbières sont bien représentés.
- Les données électromagnétiques de géophysique aéroportée permettent de mettre en évidence des zones de salinité différente et de différencier des structures en grand. La caractérisation spatiale fine des géométries sur un plan vertical n'est pas possible, du fait de la complexité et de l'hétérogénéité de l'architecture sédimentaire (prismes progradants) (**Figure 2**).

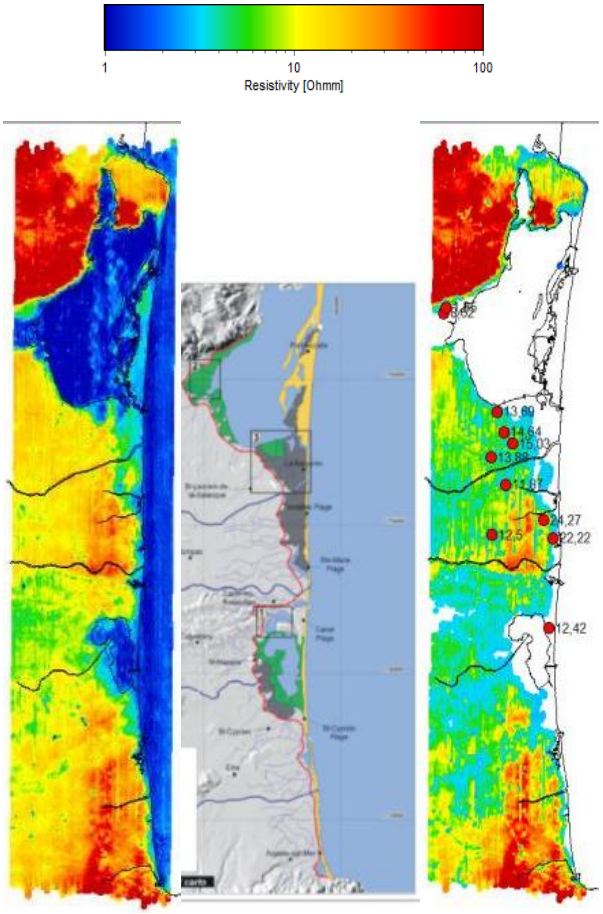



FIGURE 2 : CARTES INTERPRETEES DE LA GEOPHYSIQUE AEROPORTEE ELECTROMAGNETIQUE POUR DEUX PROFONDEURS DIFFERENTES (A GAUCHE DE 0 A 5 M ET A DROITE DE 20 A 50 M) ET CARTE DES PALEOETANGS (ZONES GRISEES FONCEES AU CENTRE)

**A l'échelle locale**, les principaux résultats des interprétations des données acquises au niveau des deux observatoires hydrogéophysiques (enregistrement de la conductivité électrique de l'aquifère, de la pression hydraulique à un pas de temps mensuel, prélèvement d'eau pour analyses hydrochimiques et isotopiques et essais hydrauliques) sont (**Délivrables 2 et 3**) :

- Test d'un prototype innovant SMD développé par imaGeau et développement en particulier concernant la longueur des flûtes avec un espacement choisi pour mieux suivre la conductivité électrique ; adaptation du protocole de mesure et notamment d'injection du courant dans un milieu fortement hétérogène et développement d'un algorithme d'apprentissage ; protection renforcée de l'électronique de mesure vis-à-vis des champs électromagnétiques externes ; installation dans l'observatoire d'un suivi de pression/température avec une fréquence de 15 min pour un meilleur suivi lors d'essais de pompage en nappe ; mise en place d'une nouvelle méthode rapide et efficace de calibration pétrophysique par évaluation de la conductivité surfacique (par estimation du pourcentage d'argile à partir du Gamma Ray) ; amélioration de la robustesse mécanique en immersion des flûtes en forage par la compréhension de perte de données sur flûte profonde (>60 m) et par l'évolution du montage des électrodes permettant un gain d'étanchéité.

- Bonne correspondance des mesures de conductivité électriques par trois méthodes différentes (SMD versus diagraphies de résistivité par induction et mesures mensuelles sur échantillon d'eau porale récupérée à l'aide du WestBay).

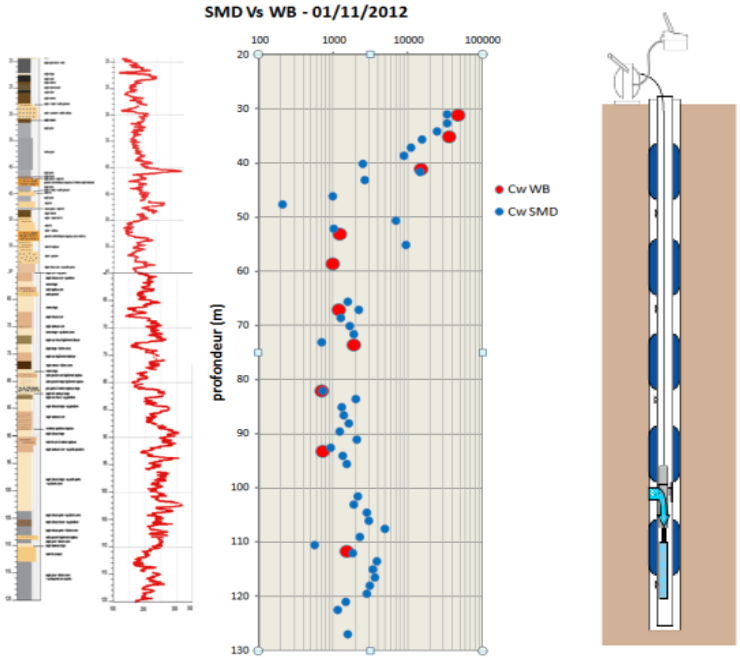



FIGURE 3 : COMPARAISON DES MESURES DE SALINITES DU SMD CALCULEES AVEC LES MESURES AU WESTBAY ET POSITION PAR RAPPORT AU GAMMA RAY ET LOG LITHOLOGIQUE

- Caractérisation des gradients hydrauliques verticaux à l'aide des mesures de pression enregistrées mensuellement sur le WestBay au Barcarès, permettant l'identification de 4 unités hydrogéologiques sur des critères hydrodynamiques. Les gradients dans l'unité inférieure (I) montrent une probable inversion des sens d'écoulement au cours de l'année, ascendants en été et descendants en hiver. Dans l'unité II, comprise globalement entre 60 et 90m, les gradients sont homogènes, descendants puis ascendants en été. Dans l'unité III, comprise entre 60m et 36m, les flux sont similaires à ceux de l'unité II, avec des charges plus élevées en automne. L'évolution des profils de charge au niveau de la partie supérieure de cette zone indique un gradient pouvant traduire une recharge par les niveaux supérieurs. L'unité IV située au-dessus de 36m correspond aux charges hydrauliques mesurées dans les formations quaternaires les plus superficielles. Celles –ci présentent une grande variabilité saisonnière indiquant également l'effet des pompages estivaux, mais aussi l'effet de la recharge entre avril et juin 2013. Les pompages saisonniers créent une zone déprimée, globalement comprise entre 40 et 94m de profondeur (zones II et III). Ces gradients verticaux très variables et très hétérogènes sont la conséquence d'un temps de réponses variables aux différentes sollicitations anthropiques de chaque unité. La réalisation d'un essai par pompage a permis de conclure, au moins pour l'unité III, de l'absence d'écoulements verticaux, malgré de forts gradients induits par le pompage, au profit d'échanges latéraux. Ces échanges latéraux sont conditionnés par des variations de faciès de dépôt à l'échelle hectométrique. Ce découpage en 4 unités et l'absence d'échanges verticaux entre chaque unité confirme les enregistrements issus du SMD (**Figure 4**).

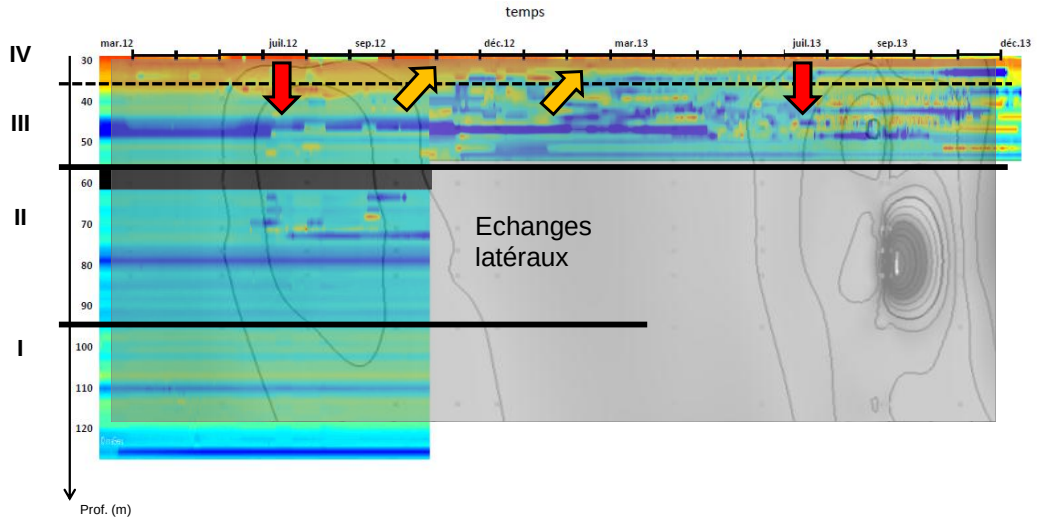



FIGURE 4 : COMBINAISON DES RESULTATS DU SMD ET DES DONNEES DE PRESSION HYDRAULIQUE A L'OBSERVATOIRE DU BARCARES

- La caractérisation de la signature géochimique et isotopique des eaux prélevées sur le WestBay au printemps 2012 a permis de mettre en évidence une grande hétérogénéité verticale de la conductivité électrique allant de 926 à 43000 µS.cm$^{-1}$ et toujours supérieure à celles mesurées dans les ouvrages de référence dans les niveaux N3 et N4 (~500 µS.cm$^{-1}$). Les niveaux les plus chargés au sein du Quaternaire atteignent ~70-80% de la salinité de l'eau de mer. Des processus d'échanges cationiques sur la fraction argileuse de la matrice sont mis en évidence en relation avec les intrusions salées mais aussi le phénomène inverse de « freshening » dans la zone 50-60m (à la période de prélèvement). Ces échanges cationiques sont aussi marqués par les isotopes du bore avec des fractionnements induits typiques des intrusions salines. Certains niveaux productifs semblent marqués par des signatures de type karst de Corbières, en lien avec des circulations en grand et/ou des interactions eau-roche avec la matrice de ces niveaux issus du démantèlement des massifs calcaires. Si les analyses en $^{14}$C montrent une baisse des activités avec la profondeur, la transposition en âge apparent n'est à l'heure actuelle pas fiable compte tenu d'apport probable de carbone organique dont on ne connait pas la nature et donc l'impact en termes d'âge. Des analyses complémentaires, en particulier en $^{3}$H, devraient permettre d'aller plus loin dans ces interprétations.

## C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats au niveau des observatoires en combinant des données géologiques, hydrogéologiques, hydrogéophysiques et hydrogéochimiques ont permis d'établir un modèle conceptuel et d'être exploités pour une modélisation hydrodynamique et de l'effet de densité selon une coupe étant mer en considérant les données de l'observatoire du Barcarès. La modélisation numérique des écoulements et de la migration d'eau salée dans la zone de Barcarès visait à améliorer la connaissance sur les intrusions salines et leurs évolutions dans cette zone (**Délivrable 4**). Plusieurs questions ont été soulevées lors de l'interprétation des données acquises dans les précédentes phases du projet. Ce travail de modélisation permet de répondre partiellement à ces interrogations :

- La forte salinité dans les niveaux supérieurs (au-dessus de 40m de profondeur) au droit du stade est attribuée à la présence d'un ancien étang au droit de la zone, étang qui aurait été comblé après 1989 ;
- Les fluctuations saisonnières de salinité vers 40m de profondeur observées sur le SMD n'ont pas pu être reproduites par le modèle. Avec la schématisation retenue, les variations des débits pompés dans les nappes du Pliocène ne permettent pas d'expliquer ces fluctuations ;
- Dans les horizons inférieurs (en dessous de 60m de profondeur), le flux d'eau est globalement faible. Les pompages n'ont que peu d'effet sur la salinité, cela entraîne une stabilité de l'intrusion dans ces niveaux à l'échelle annuelle.

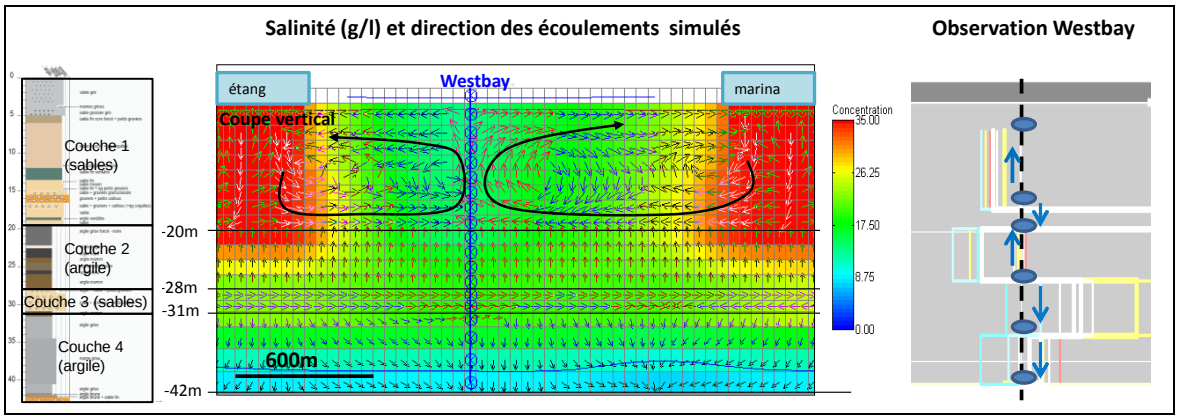



FIGURE 5 : COMPARAISON DES SENS D'ECOULEMENT VERTICAUX MODELISES ET DES MESURES DE GRADIENTS DANS LE WESTBAY

Ce travail de modélisation est marqué par de fortes incertitudes induites par la connaissance trop partielle des aquifères et de l'intrusion saline à l'échelle du modèle (kilométrique). En effet, de nombreuses informations sont disponibles à l'échelle de la plaine du Roussillon (découpage des aquifères, direction globale d'écoulement, transmissivité des aquifères, qualité,…) et l'on dispose également de données très précises ponctuellement, notamment au niveau des observatoires mis en place dans le cadre du présent projet, mais peu de données à l'échelle kilométrique sont disponibles. Ce déficit de données a d'autant plus d'importance dans un contexte où le milieu souterrain est très hétérogène. En conséquence, ce modèle reste exploratoire et, compte tenu des incertitudes, il est difficile de conclure quant aux simulations prospectives. Ainsi une meilleure caractérisation des aquifères dans la zone serait nécessaire pour réduire les incertitudes liés au modèle et in fine en faire un réel outil de gestion des aquifères dans la zone d'étude.

## C.6 DISCUSSION

Le projet ANR GRAIN D'SEL a cherché à exploiter l'ensemble des données acquises par différentes technologies innovantes de l'échelle régionale à l'échelle locale au niveau d'un aquifère côtier, afin d'acquérir de nouvelles connaissances sur les intrusions salines dans un aquifère sédimentaire côtier tel que l'aquifère du Roussillon. L'acquisition de données géophysiques de type profil Gamma Ray sur des forages existants a été envisagée afin de permettre une meilleure calibration des données de géophysique aéroportées. Elle n'a pas pu être réalisée à cause de la nature des équipements des forages (tubages métalliques ou trop étroits ou d'accès impossible). Les données de géophysique aéroportée n'ont pas permis

d'obtenir une image différenciée au niveau de la vertical à cause de l'homogénéisation du signal liée à la conductivité électrique importante de la masse argilo- silteuse renfermant des corps sédimentaires métriques à plurimétriques, mais néanmoins ont permis d'imager en surface des zones de différentes conductivités, correspondant à des zones de salinité différente au niveau des cordons littoraux, des étangs et anciennes zones d'étangs asséchés en particulier, et de localiser des zones d'intérêt pour l'implantation d'observatoires à l'échelle locale en valorisant les données géologiques et hydrogéologiques existantes (données de salinité d'eau ponctuelle au niveau de forages).

Les deux observatoires à l'échelle locale, au niveau des sites à Canet et à Barcarès implantés à partir des informations géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques et des données foncières ont permis de tester et poursuivre le développement du SMD (© ImaGeau) et d'obtenir des résultats illustrant la complexité des milieux hétérogènes de bassins sédimentaires de deltas progradants et subsidents et des variations de salinité selon différentes fréquences. Les résultats montrent l'apport de ce type d'observatoire pour imager sur le long terme des variations de salinité pour différentes fréquences (hautes fréquences = semaine et basses fréquences= saison, année), par rapport à d'autres techniques plus coûteuses de type sismique haute résolution ou électrique de surface de manière répétée.

Les objectifs initiaux du projet prévoyaient la conception d'un système d'alerte et de gestion des aquifères littoraux intégrant les résultats des approches régionales et locales. Le projet a permis la mise en évidence de l'apport d'une approche systémique pluridisciplinaire pour l'étude des intrusions salines des aquifères littoraux sédimentaires détritiques. Si une modélisation a été réalisée afin de simuler les observations au niveau de l'observatoire du Barcarès (SMD et Westbay), les résultats sont caractérisés par des incertitudes liées à l'hétérogénéité importante du milieu et il n'a pas été possible de définir un système d'alerte couplant données des observatoires et modélisation. Il est nécessaire pour pouvoir modéliser ce type de phénomène sur des secteurs identifiés pouvant être sujet à des intrusions salines, de disposer de données détaillées concernant la géologie et l'hydrogéologie. Néanmoins, l'approche systémique est appropriée pour la caractérisation des intrusions salines.

## C.7 CONCLUSIONS

Au vu de la complexité des milieux aquifères détritiques issus de la mise en place par des prismes progradants subsidents de granulométrie différente avec des corps sableux plurimétriques, il est nécessaire de poursuivre des travaux de recherche concernant la caractérisation de l'hétérogénéité du point de vue sédimentologique et hydrogéologique par des approches géostatistiques voire génétiques et de poursuivre le suivi des paramètres au niveau des observatoires SMD en y ajoutant des capteurs de pression, afin de pouvoir disposer sur un seul forage d'informations nécessaires à la modélisation des phénomènes et à la définition de seuils d'alerte. Les résultats de tests et développement du SMD ont d'ores et déjà permis à ImaGeau d'améliorer son offre de service : amélioration du dispositif du point de vue technologique et d'acquisition des données pour des profondeurs supérieures à 100m (étanchéité, injection du courant, …). La poursuite du développement du SMD avec une intégration de mesures de pression et conductivité/température selon la même approche que pour la salinité constitue une innovation technologique et économique. Ces observatoires SMD peuvent être utilisés dans le cadre de suivi d'aquifères côtiers pour lesquels les intrusions salines sont un enjeu, en sélectionnant selon une approche multi-

échelle les sites à suivre en priorité, ainsi que pour le suivi des échanges nappe-rivières en contexte continental et littoral.

Ces observatoires pourront être utilisés et valorisés dans le cadre de projets de recherche, projets de démonstrateurs tels que proposés dans le cadre du CPER Languedoc Roussillon, qui font l'objet de montage de projet actuellement.

L'équipe de projet remercie Schlumberger Water services pour son soutien pour l'équipement des observatoires par l'intermédiaire des Sciences de l'Univers (OSU) « OREME » (www.oreme.univ-montp2.fr), ainsi que les collectivités du Barcarès et de Canet et de Perpignan Agglomération pour leur mise à disposition des terrains d'expérimentation.

### C.8 REFERENCES

Aunay B. (2007). Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers, thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Custodio E. (2010): Coastal aquifers of Europe: an overview, Hydrogeology Journal (2010) 18: 269–280.

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 Université de Montpellier II, 295 pp.

Jones, B.F., Vengosh, A., Rosenthal, E. et Yechieli, Y., 1999. Geochemical investigations. In: Bear J., Cheng A.H.-D., Sorek S., Ouazar D., Herrera I. (1999), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, pp. 51-71.

## D LISTE DES LIVRABLES

| Tâche | Intitulé et nature des livrables et des jalons | Jalon effectif | Partenaire responsable du livrable/jalon |
|---|---|---|---|
| **1.** | | | |
| | Base de données géoréférencée sur le Roussillon (géométries, suivi piézo, etc.) | 3 => 6 | BRGM |
| | Cartes et blocs 3D de paramètres géophysiques interprétés | 6=> 9 | BRGM |
| | Modèles conceptuels et typologies d'intrusions salines | 9 | BRGM |
| | Rapport de synthèse de la tâche 1 | 12 => 16 | BRGM |
| **2.** | | | |
| | Sites tests instrumentés | 15=> 20 | imaGeau |
| | Protocole d'acquisition de données hydro-géophysiques | 15=>20 | GM |
| | Mise en place du suivi hydrogéologique et hydrogéochimique complémentaire | 12 => 24 | BRGM |
| | Rapport de synthèse de la tâche 2 | 24=> 48 | imaGeau |
| **3.** | | | |
| | Paramètres de calibration de l'hydro-géophysique en forage | 18=> 24 | GM |
| | Données interprétées et intégrées pour la modélisation | 24=> 44 | BRGM |
| | Rapport de synthèse de la tâche 3 | 24=> 48 | GM |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **4.** | | | |
| | Etat de l'art sur les systèmes de surveillance et/ou d'alerte | 18=> 24 | BURGEAP |
| | Premiers modèles hydrodynamiques des deux sites tests (un seul site) | 30=> 48 | BURGEAP |
| | Modèles hydrodynamiques calibrés sur les deux sites tests (un seul site) | 36=> 48 | BURGEAP |
| | Etude de faisabilité pour un système de surveillance et d'alerte (abandonné) | 36 | BURGEAP |
| | Rapport de synthèse de la tâche 4 | 36 => 48 | BURGEAP |

*A noter le retard pris sur l'instrumentation des sites et l'acquisition des données sur les observatoires, liés aux contraintes foncières d'une part et d'autre part à la décision d'acquérir des données complémentaires avec l'implantation d'un piézomètre multi niveau au niveau du littoral.*

## Détail des livrables de type rapport

| **Date de livraison** | **N°** | **Titre** | **Nature** (rapport, logiciel, prototype, données, …) | **Partenaires** (souligner le responsable) | **Commentaires** |
|---|---|---|---|---|---|
| Février - Juillet 2011 | D1 | Approche régionale | Rapport | Brgm | Etat de l'art et typologie des intrusions salines en aquifères détritiques côtiers<br>Interprétation des données de géophysique aéroportée<br>Localisation de sites pour implantation des observatoires |
| Février 2014 | D2 | Approche locale et équipement des observatoires | Rapport | ImaGeau, brgm, Géosciences | Description de l'instrumentation des observatoires (SMD et WeestBay) et interprétation des données hydrogéochimiques |
| Avril 2014 | D3 | Interprétation et calibrage des données des observatoires | Rapport | Géosciences, Imageau, brgm | Description méthodes de calibration des données du SMD, interprétation des données hydrogéologiques des Westbay et essais de pompage |
| 2012 | D4. 1. | Etat de l'art des systèmes d'alerte pour les aquifères littoraux | Rapport | Burgeap, brgm | Etat de l'art |
| Février 2014 | D4. 2. | Rapport de modélisation | Rapport | Burgeap | Description du site, des objectifs de la modélisation, démarche, résultats et limites |
| Août 2010 | D0. 1 | Rapport d'avancement 1er semestre | Rapport | Brgm, Geosciences, Imageau, Cefrem, Burgeap | |
| Septembre 2011 | D0. 2 | Rapport d'avancement 3ème semestre | Rapport | Brgm, Geosciences, Imageau, Cefrem, Burgeap | |
| Octobre 2011 | D0. 3 | Rapport intermédiaire | Rapport | Brgm, Geosciences, Imageau, Cefrem, Burgeap | |
| Mai 2012 | D0. 4 | Rapport d'avancement 5 ème semestre | Rapport | Brgm, Geosciences, Imageau, Cefrem, Burgeap | |

# E IMPACT DU PROJET

## E.1 INDICATEURS D'IMPACT

### *Nombre de publications et de communications*

| | | Publications multipartenaires | Publications monopartenaires |
|---|---|---|---|
| **International** | **Revues à comité de lecture** | 1 | |
| | **Ouvrages ou chapitres d'ouvrage** | | 1 |
| | **Communications (conférence)** | 3 | |
| **France** | **Revues à comité de lecture** | | |
| | **Ouvrages ou chapitres d'ouvrage** | | |
| | **Communications (conférence)** | 2 | |
| **Actions de diffusion** | **Articles vulgarisation** | | 1 |
| | **Conférences vulgarisation** | 2 présentations des résultats du projet en cours (juillet 2010) et à la fin (février 2014) | |
| | **Autres** | Site internet du projet | |

### *Autres valorisations scientifiques*

| | Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables) |
|---|---|
| **Brevets internationaux obtenus** | Pas de brevet dans le cadre du projet |
| **Brevet internationaux en cours d'obtention** | / |
| **Brevets nationaux obtenus** | / |
| **Brevet nationaux en cours d'obtention** | / |
| **Licences d'exploitation (obtention / cession)** | / |
| **Créations d'entreprises ou essaimage** | / |
| **Nouveaux projets collaboratifs** | Montage d'un projet de démonstrateur en Roussillon dans le cadre de la Smart Specialisation CPER 2015-2017 |
| **Colloques scientifiques** | / |
| **Autres (préciser)** | Développement d'un SMD complémentaire par Imageau et qui lui a permis d'étoffer son offre et de décrocher de nouveaux contrats suite au test effectué dans le cadre du projet.<br>Présentation des résultats intermédiaires en juillet 2010 et résultats du projet à fin février 2014, avec AERMC, CG66, Conseil Régional LRO, Syndicat Mixte pour la protection et la gestion des nappes souterraines de la plaine du Roussillon, Syndicat Mixte d'Etudes et de Travaux de l'Astien, Syndicat de la nappe de Crau (SYMCRAU),Pôle Eau Montpellier, Transfert LR. |

## LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

### Conférences internationales

Dörfliger N., Fawzia A., Perrin J., De Paris J., Bourgeois B., Caballero Y., Fleury P, Pezard Ph.,Loffi J.,J. Paris, Neyens D, Traverse S., Certain R. (2011): Contribution of EM airborne geophysics to characterize seawater intrusion within a Plio-Quaternary coastal Mediterranean aquifer in order of improving management and early warning systems, *EGU Vienna 2011.*

Dörfliger N., Petelet Giraud E., Caballero Y., Bailly Comte V., Aunay B., Neyens D., Bellot J-Ph., Pezard Ph., Geeraert M. (2013): Assessment of vertical salinity changes in a detrital coastal aquifer from hydrogeophysical and geochemical monitoring at two pilot sites, *IAH 2013 Perth Australia, congress.*

Pételet-Giraud E., Négrel Ph., Guerrot C., Aunay B., Dörfliger N. (2013): Origins and processes of salinization of a Plio-Quaternary coastal Mediterranean multilayer aquifer: the Roussillon Basin case study, Water Rock Interaction [WRI14], *Procedia Earth and Planetary Science* 7 ( 2013 ) 681 – 684

### Conférence en France

Dörfliger N., Asfirane F, Aunay B., Caballero Y., Fleury P., Pezard P., Lofi J., Neyens D., Certain R., Chastanet J., Traverse S. (2012) : Approche géophysique et hydrogéologique à l'échelle régionale et locale pour la caractérisation des intrusions salines au sein d'un aquifère côtier sédimentaire poreux, *Colloque CFH AIH 2012 Cassis*.

Dörfliger N. (2011) Nouvelles approches innovantes pour le suivi des aquifères côtiers: application à la surveillance des intrusions salines, *séminaire COPED* sur l'eau en Afrique. Académie des Sciences, mai 2011.Paris.

### Chapitre de livre

Dörfliger N., Aunay B., Fleury P. (2013) : Interface continent-mer : un continuum hydrogéologique. Chapitre 4 du livre: Collection "Mer & Océan", VOL.1 : "*Le système océanique : complexité"*, ISTE editions, sous la direction de Monaco A. et Prouzet P., p 145-180.

### Article à comité de lecture

Pételet-Giraud E., Négrel Ph., Guerrot C., Aunay B., Dörfliger N. (2013): Origins and processes of salinization of a Plio-Quaternary coastal Mediterranean multilayer aquifer: the Roussillon Basin case study, Water Rock Interaction [WRI14], *Procedia Earth and Planetary Science* 7 ( 2013 ) 681 – 684

### Articles à comité de lecture en préparation

Pételet-Giraud E., Négrel Ph., Guerrot C., Dörfliger N., Bailly Comte V., Ladouche B., Aunay B. (2014) : Multi-layer aquifer salinity: Origin and processes evidenced by a multi-isotope approach. Example of the Plio-Quaternary coastal aquifer of the Roussillon Basin (S. France) *Applied Geochemistry* (journal visé)

Dörfliger N., Bailly-Comte V., Caballero Y., Neyens D., Bellot J-Ph., Pezard Ph., Geeraert M., Chastanet J., Come J-M. (2014): Characterization of salt water intrusion within a multi layer coastal aquifers through a muli disciplinary approach: geophysics, hydrogeophysics,

hydrogeochemistry and hydromodelling Example of the Plio Quaternary coastal aquifer of the Roussillon basin (South France) , *Hydrogeology Journal ou Journal of Hydrology*

**Article vulgarisation**

Dörfliger N. (2013) :Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral, pp 76-83, Géosciences N° 17, Le Littoral, édition brgm. http://www.brgm.fr/content/geosciences-ndeg17-littoral

## E.2 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Afin de mieux appréhender les phénomènes d'évolutions de salinité, imaGeau a proposé d'installer un SMD complémentaire permettant d'enregistrer des pressions (hauteur de nappes) et des températures à différents niveaux dans le cadre du projet, alors que cela n'était pas prévu initialement. Ceci a permis de tester et valider une approche multi-paramètres afin de mieux caractériser et appréhender les phénomènes mis en jeu lors d'échange entre nappes phréatiques. Cette technologie, une fois validée dans le projet, a permis à imaGeau de l'intégrer dans son offre lors d'un autre chantier et ainsi de diversifier son offre afin de mieux répondre aux besoins des clients (CCMG Marana – Bastia). Un nouveau partenariat pour ImaGeau a été donc réalisé de ce fait.

De plus, dans le cadre de la préparation du prochain CPER de la région Languedoc Roussillon, un démonstrateur – plate-forme à disposition de la communauté scientifique et des entreprises, PME, pour le développement de nouveaux dispositifs d'observation, de mesures a été proposé et retenu. Le projet est en cours de montage et a bénéficié des résultats du projet ANR Grain d'sel et pourra valoriser les observatoires hydrogéophysiques du projet dans la continuité.

## E.3 IMPACT AU NIVEAU DES PARTENAIRES INDUSTRIELS

### *Entreprise ImaGeau*

| | |
|---|---|
| Entreprise | ImaGeau |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | Denis Neyens, d.neyens@imageau.fr |

ImaGeau a installé ses prototypes de monitoring de la conductivité électrique (SMD) dans un environnement particulier (profondeur dépassant 100 m), ce qui a permis d'améliorer la technologie (étanchéité, fiabilité…).

Les activités d'imaGeau dans ce projet ont eu pour axes :

- Le développement et l'améliorations techniques sur les prototypes de SMD imaGeau ;
- Le développement de méthodes rapide et à moindre coût de calibration des SMD (transformation des mesures de résistivité apparente en conductivité de l'eau) ;
- La validation des mesures effectuées par le SMD imaGeau par comparaison avec d'autres méthodes de mesure de conductivité (WestBay) ;
- Le développement, tests et validation d'autres types de SMD basés sur des mesures de température et de pression in-situ

Ces activités ont permis de faire évoluer notre technologie, nos services et nos études en apportant robustesse, intégration et rapidité de mise en oeuvre, tant d'un point de vue technique que scientifique. Le modèle de fonctionnement issu de ce projet a été intégré dans nos offres.

### *Entreprise Burgeap*

| | |
|---|---|
| Entreprise | Burgeap |
| Rédacteur (nom + adresse mél) | Jean Marie Côme, jm.come@burgeap.fr |

La contribution de Burgeap au projet concerne principalement la tâche 4 :

- L'Etat de l'art sur les systèmes de surveillance et d'alerte
- La modélisation numérique des écoulements et de la migration d'eau salée dans la zone de Barcarès.

Notre participation au projet a permis de renforcer notre expertise sur la métrologie des systèmes de surveillance et d'alerte, l'interprétation couplée de données géologiques, hydrogéologiques et hydrogéophysiques, ainsi que sur la modélisation numérique des écoulements/transport d'eau salée. Ces compétences ont (et seront) été valorisées dans plusieurs contrats commerciaux relatifs à la gestion des aquifères côtiers.

## E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

*Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.*
*Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.*

*Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.*

| Identification | | | | Avant le recrutement sur le projet | | | Recrutement sur le projet | | | | Après le projet | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nom et prénom | Sexe H/F | Adresse email (1) | Date des dernières nouvelles | Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement | Lieu d'études (France, UE, hors UE) | Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans) | Partenaire ayant embauché la personne | Poste dans le projet (2) | Durée missions (mois) (3) | Date de fin de mission sur le projet | Devenir professionnel (4) | Type d'employeur (5) | Type d'emploi (6) | Lien au projet ANR (7) | Valorisation expérience (8) |
| Matthieu Blanc | H | blanc_mat @yahoo.fr | Début 2014 | Master Hydrogéologie | France Montpellier II | CDD | BRGM | Ingénieur étude | 2 mois | Décembre 2011 | CDI | Agence de l'Eau RM&C | Chargé de mission ressources en eau | aucun | oui |
| Cedric Brunel | H | cedric.brunel@univ-perp.fr | En contact | Doctorat | France CEREGE | Post-doc | CEFREM UPVD | Ingénieur d'étude | 6 mois | Mai 2011 | CDD | UPVD | Ingénieur d'étude | aucun | non |
| Agathe Deleau | F | | Fin 2013 | MasterHydrogéologie | France Montpellier II | CDD | Géosciences CNRS UMII | Ingénieur d'étude | 4 mois | ???? | ? | ? | Ingénieur d'étude | aucun | ? |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

### *Aide pour le remplissage*

**(1) Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
**(2) Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
**(3) Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
**(4) Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
**(5) Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
**(6) Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
**(7) Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
**(8) Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.