

Réf: EP/ECA/TEPF/DG/SPG
D. Gazaniol / N° 13.62

Lacq, le 22 octobre 2013

RAPPORT QUINQUENNAL C4000

2007 - 2012



TOTAL

Adresse : RD 817 - BP 22 - 64170 Lacq - FRANCE
Tél. : +33 (0)5 59 92 22 22

Raison sociale : TOTAL E&P FRANCE - Société par Actions Simplifiée au capital de 76 250 000 euros
Siège social : 2 place Jean Millier - La Défense - 92400 Courbevoie - FRANCE - 409 160 132 RCS Nanterre

SOMMAIRE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Rappel historique des évolutions du projet C-4000 | 5 |
| 2 | Evolution du cadre réglementaire pendant la période 2007-2012 | 6 |
| 2.1 | Arrêtés | 6 |
| 2.2 | Arrêtés complémentaires concernant les clients de la plate-forme SOBEGI | 6 |
| 2.3 | Comité Local de Suivi des Injections | 6 |
| 3 | Le suivi des effluents injectés sur la période 2007-2012 | 7 |
| 3.1 | Evolution des volumes injectés | 7 |
| 3.2 | La surveillance de la qualité des effluents | 10 |
| 3.2.1 | Nature et fréquence des contrôles réalisés | 10 |
| 3.2.2 | Aspects méthodologiques | 10 |
| 3.2.3 | Résultats du suivi analytique sur les eaux injectées | 12 |
| 3.2.4 | Rappel des faits marquants ayant pu avoir une influence sur la qualité des effluents injectés | 14 |
| 3.3 | Étude des solutions alternatives à l'injection au C4000 | 18 |
| 4 | Les opérations sur les puits d'injection | 19 |
| 4.1.1 | Opérations de Work Over | 19 |
| 4.1.2 | Interventions sur les filtres | 19 |
| 4.1.3 | Le remplacement du pipe de transfert des eaux biodégradables de SOBEGI | 20 |
| 4.2 | Le contrôle des installations de surface et du réseau de collectes | 20 |
| 4.2.1 | Les contrôles par gammagraphie | 22 |
| 4.2.2 | Les contrôles par ultrasons | 22 |
| 4.2.3 | Les contrôles de la protection cathodique | 22 |
| 5 | Bilan Gisement | 23 |
| 5.1 | Observations sur le réservoir de Lacq Profond | 23 |
| 5.1.1 | Description des moyens | 23 |
| 5.1.2 | Analyses des acquisitions 2007- 2012 | 24 |
| 5.1.2.1 | Evolution de la pression | 24 |
| 5.2 | Comportement du champ | 28 |
| 5.2.1 | Observations générales | 28 |
| 5.2.2 | Bref historique des modèles précédents | 29 |
| 5.2.3 | Evolutions des modèles ECLIPSE sur la période 2007-2012 | 30 |
| 5.3 | L'expertise du BRGM sur le dossier de demande d'injection de ARKEMA-MONT | 32 |
| 5.4 | Etudes géochimiques des relations fluides injectés-matrice minérale du réservoir (annexe 4) | 32 |
| 5.4.1 | Etude 2011(rapport n° DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-051 par Pierre Chiquet, daté de novembre 2011) | 33 |
| 5.4.2 | Etude complémentaire 2011/2012 (rapport n° DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-052, daté d'avril 2012) | 33 |
| 5.5 | Analyse de l'évolution de la teneur en H2S dans le gaz produit | 34 |
| 5.6 | Acquisitions sur les puits injecteurs | 36 |
| 5.7 | Confinement du réservoir et écoute sismique | 38 |
| 5.7.1 | Ecoute sismique (Annexe 3) | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 5.7.2 Observations sur le réservoir de Lacq Supérieur et récif sous-jacent..... | 41 |
| 6 Conclusions | 46 |
| 7 Perspectives | 50 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Evolution des volumes injectés dans le réservoir C4000 pour la période 2007-2012 | 8 |
| Figure 2 : Evolution des flux contributeurs de SOBEGI par entreprises | 9 |
| Figure 3 : Schéma des installations soumises à contrôle de corrosion | 21 |
| Figure 4: Isobathes au toit du réservoir de Lacq Profond | 24 |
| Figure 5: Historique des mesures de pression de 1957 à l'actuel | 25 |
| Figure 6: Pressions à -3700 mV/NM entre 2005 et l'actuel..... | 25 |
| Figure 7: P/Z (bara) à -3700 mV/NM vs Gaz cumulé produit de LAP (origine – 2012)..... | 28 |
| Figure 8: P/Z (bara) à -3700 mV/NM et débit journalier (KSm ³ /j) vs Gaz cumulé produit de LAP (1978-2012) | 29 |
| Figure 9: Modélisation ECLIPSE et mesures sur LA119 de janvier 2000 à l'actuel | 31 |
| Figure 10: schéma d'injection actuel (étude 2011)..... | 33 |
| Figure 11: Teneur en H ₂ S de l'effluent produit en fonction de la pression: mesures et modèles | 34 |
| Figure 12: Localisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 | 39 |
| Figure 13: Visualisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 | 40 |
| Figure 14: Visualisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 | 40 |
| Figure 15: Localisation 2D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 (vue de dessus – couleur selon la profondeur) | 40 |
| Figure 16: carte des isobathes au Toit du réservoir Sénonien inférieur et localisation des puits | 41 |
| Figure 17: Lacq Supérieur – Suivi de la pression sur l'observateur LA96 : 2005-actuel | 42 |
| Figure 18: Modèle multi-tank de Lacq Supérieur par Bilan | 44 |
| Figure 19: Calage des pressions du Réservoir de Lacq Supérieur et du Récif à la cote -525 mV/NM : mesures et Modèle MBAL multi-tank..... | 45 |
| Figure 20: Schéma de l'état actuel des injections | 48 |
| Tableau 1: Evolution des volumes injectés par établissements sur la période 2007-2012..... | 7 |
| Tableau 3 : Interventions sur les filtres LA102 | 19 |
| Tableau 4 : Interventions sur les filtres LA109 | 19 |
| Tableau 5 : Périodicité des contrôles des installations de surface et du réseau de collecte | 20 |
| Tableau 6 : échancier des contrôles par types d'installations | 21 |
| Tableau 7: Résultats des mesures GPPS sur les puits de LAP en 2011 et 2012..... | 27 |
| Tableau 8: Composition du gaz produit (% volumique)..... | 36 |
| Tableau 9: résultats des tests d'injectivité aux puits LA102 et LA109 de 2006 à 2012 | 37 |
| Tableau 10: Mesures de pression sur le réservoir Sénonien inférieur de Lacq supérieur et le récif Albo-aptien..... | 43 |

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Rapports de calage des autocontrôles

Annexe 2 : Résultats du suivi analytique sur les eaux injectées dans le C 4000

Annexe 3 : Rapport de synthèse surveillance sismique Société MAGNITUDE

Annexe 4 : Rapports des études géochimiques interactions fluides-matrice

1 Rappel historique des évolutions du projet C-4000

Nous rappelons ici les principales étapes de l'évolution du dispositif d'injection des eaux de Lacq dans le C-4000 :

1974 : Démarrage de l'injection d'eaux industrielles dans le C4000 avec la création de la plate-forme SOBEGI de Mourenx et le démarrage de l'unité ATG (Acide Thioglycol). Les eaux sodées du traitement gaz sont également injectées. Débit d'injection jusqu'à 1200 m³/h.

1980 : Arrêt de l'injection des eaux sodées sur le C4000 et injection dans le gisement Lacq Supérieur (puits LA 91) pour améliorer la récupération de l'huile dans le réservoir.

15 Septembre 1987 : Reprise de l'exploitation du C4000 par SNEAP/DEL.

1996 : Début de l'injection sur le puits LA 102.

24 Janvier 2002 : Avis favorable du Conseil supérieur des Installations Classées à la suite de la présentation par TEPF de l'étude générale de sûreté.

1^{er} Janvier 2003 : Arrêt de l'injection des eaux sodées du traitement gaz dans Lacq Supérieur (LA 90) et retour vers le C4000.

Janvier – Mars 2003 : Travaux de Work Over sur le puits LA 109.

Juillet 2003 : Mise en service de la station de traitement des eaux et transfert des eaux biodégradables de SOBEGI

Juillet – Décembre 2003 : Mise en conformité de l'installation de surface du puits LA 109.

1^{er} Février 2004 : Transfert des eaux de condensation de la compression gaz de Lacq Supérieur (LA 20) vers le C4000.

Mars 2004 : Installation d'une sonde sismique tri-axiale dans LA 405

Octobre – décembre 2004 : Travaux de Work Over sur le puits LA 102.

12 Décembre 2006 : Mise en service de la nouvelle canalisation EIU SOBEGI.

Décembre 2007 : Mise en place d'un nouveau système de suivi microsismique composé de 4 sondes triaxiales SQUID dans La405 dont le suivi est confié à la société Magnitude.

De 2009 à 2011 : Reprise du modèle ECLIPSE et nouveau calage de l'historique du gisement.

Décembre 2010 à 2013 : Lancement d'une étude de surface dans l'objectif d'étudier les possibilités de limitations des flux dans le C-4000.

Novembre 2011 et avril 2012 : Nouvelles études de modélisations des interactions fluides-matrice, intégrant la dimension transport et le facteur thermique au sein du réservoir.

2 Evolution du cadre réglementaire pendant la période 2007-2012

2.1 Arrêtés

D'un point de vue réglementaire, la période 2007-2012 n'a vu aucune modification des dispositions déjà prises.

Les deux arrêtés préfectoraux en vigueur pour encadrer les conditions d'exploitation et de contrôle du dispositif d'injection dans le C-4000 sont donc :

- L'arrêté préfectoral n° 02/IC/477 du 30/10/2002
- L'arrêté préfectoral n° 06/IC/62 du 27/02/2006

On notera que depuis juin 2013 un arrêté préfectoral complémentaire (n°2609/2013/23 du 25/06/2013) autorise la société TOTAL E&P France à injecter les effluents de la future Unité de traitement de Gaz de SOBEGI dans le C4000.

2.2 Arrêtés complémentaires concernant les clients de la plate-forme SOBEGI

Les activités industrielles de chacun des clients de la plate-forme SOBEGI à Moureux relèvent d'arrêtés préfectoraux spécifiques que nous ne commenterons pas ici.

On notera pour mémoire qu'en ce qui concerne les effluents destinés à être injectés dans le C-4000, ces installations sont encadrées par des prescriptions stipulant :

- Le débit journalier maximal autorisé
- La température d'injection des effluents
- La plage de pH autorisée pour les effluents ($6.5 < \text{pH} < 9.5$)
- Les teneurs autorisées pour les matières en suspension (MES) à savoir :
 - 600 mg/l en moyenne journalière
 - 300 mg/l en moyenne mensuelle
 - Leur destructabilité à HCL doit être $>40\%$

2.3 Comité Local de Suivi des Injections

Le Comité assurant le suivi des injections dans le C4000 se réunit 2 fois par an pour analyser et évaluer le compte rendu annuel d'exploitation du dispositif.

Il est composé :

- de représentants de l'administration,
- de représentants des industriels,
- de représentants des collectivités,
- de représentants d'organisations syndicales,
- de représentants d'associations.

3 Le suivi des effluents injectés sur la période 2007-2012

3.1 Evolution des volumes injectés

Les flux injectés dans le C4000 sont différenciés en fonction de leurs origines respectives :

- D'une part les eaux de condensation du gaz produit par le gisement. Ces eaux, réintégrant le gisement de leurs origines ne sont pas comptabilisées conformément à l'arrêté de 2006.
- D'autre part les flux d'eaux industrielles autorisés par l'arrêté n° 02/IC/477 du 3/10/2002
- Eaux de condensation du gisement TEPF

La précédente période quinquennale avait été marquée par la reprise en 2003, de l'injection dans le C4000 des eaux de condensation du gaz produit à Lacq Profond qui étaient précédemment injectées dans le puits LA 20 du gisement de Lacq Supérieur.

La période 2007-2012 montre la décroissance programmée des volumes injectés qui passent de 115 000 m³ en 2007 à 97 000 m³ en 2012.

| | TEPF Eaux Condensation | Cumul Arrêté C4000 | TEPF | ARKEMA Lacq | SOBEGI |
|--------------|------------------------------|-----------------------|---------|----------------|---------|
| 2007 | 114 852 | 165 777 | 37 516 | 27 393 | 100 868 |
| 2008 | 115 722 | 109 460 | 19 263 | 11 198 | 78 999 |
| 2009 | 118 849 | 95 693 | 20 409 | 13 405 | 61 879 |
| 2010 | 111 086 | 84 727 | 11 042 | 11 679 | 62 006 |
| 2011 | 100 160 | 68 493 | 7 378 | 10 238 | 50 877 |
| 2012 | 96 889 | 69 299 | 10 409 | 9 665 | 49 225 |
| TOTAL | 657 558 | 593 449 | 106 017 | 83 578 | 403 854 |

Tableau 1: Evolution des volumes injectés par établissements sur la période 2007-2012

- Les flux relevant de l'arrêté n° 02/IC/477 du 3/10/2002

L'évolution des volumes d'eaux industrielles injectés dans le réservoir C4000 sur la période 2007-2012 est présentée par origine d'effluents et récapitulée dans le Tableau 1 et la figure 1.

- TEPF

L'évolution des volumes injectés par TEPF montre une baisse régulière de 2007 à 2011, les flux passant de plus de 37 000 m³/an en 2007 à 7378 m³/an en 2011, en raison de la réduction des quantités de gaz brut traitées.

Cette baisse de la production de gaz ayant entraîné une surcapacité des unités de traitement, l'arrêt d'une désulfuration a occasionné en 2012 une augmentation des flux envoyés au C-4000 (par augmentation du lavage à la soude) qui sont remontés à 10 409 m³/an.

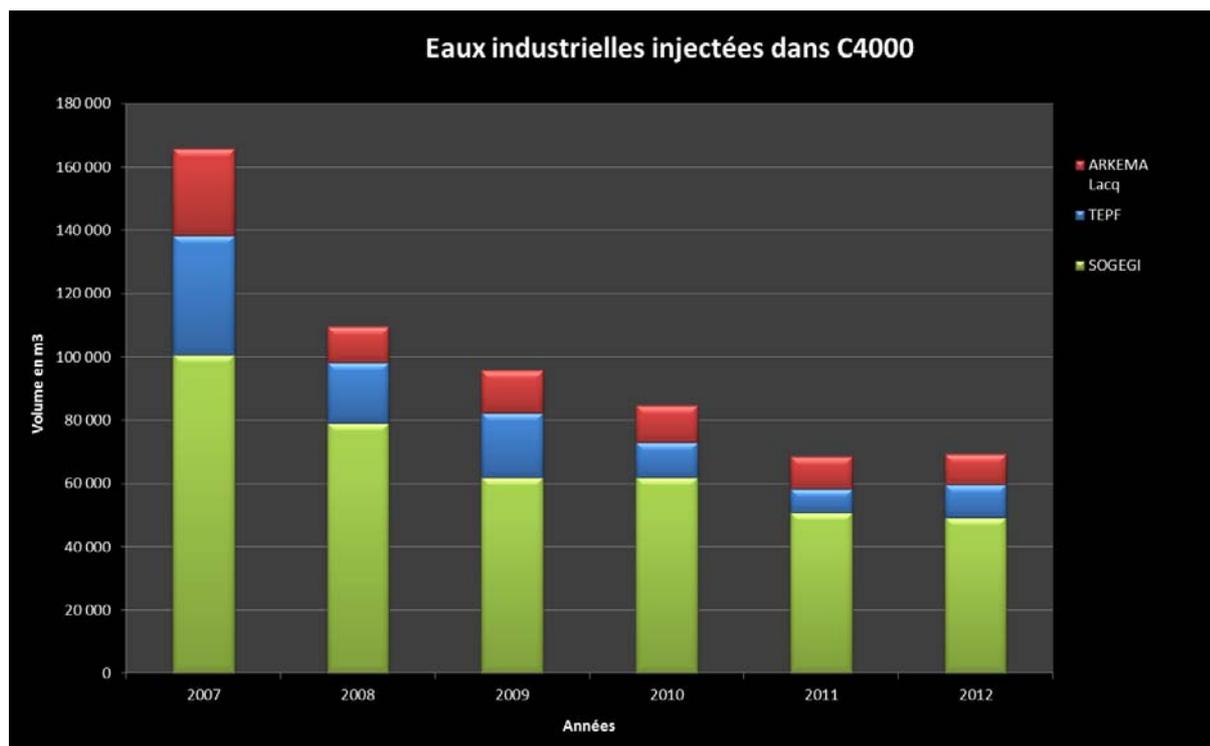


Figure 1 : Evolution des volumes injectés dans le réservoir C4000 pour la période 2007-2012

- ARKEMA Lacq

L'année 2008 a été marquée par une baisse importante des flux (-6000m^3) suite à l'arrêt de l'injection temporaire de la phase liquide issue de l'unité de désaromatation du gaz acide.

La fin de la période voit ensuite se stabiliser les flux autour de $10\,000\text{ m}^3$ par an.

- SOBEGI

Les volumes SOBEGI sont en baisse continue ($- 50\%$ sur la période).

En fonction des différents usagers de la plateforme on peut noter principalement par ordre de contribution :

- ARKEMA Mourenx
- CHIMEX.
- FINORGA,
- SPEICHIM
- SANOFI

- SBS

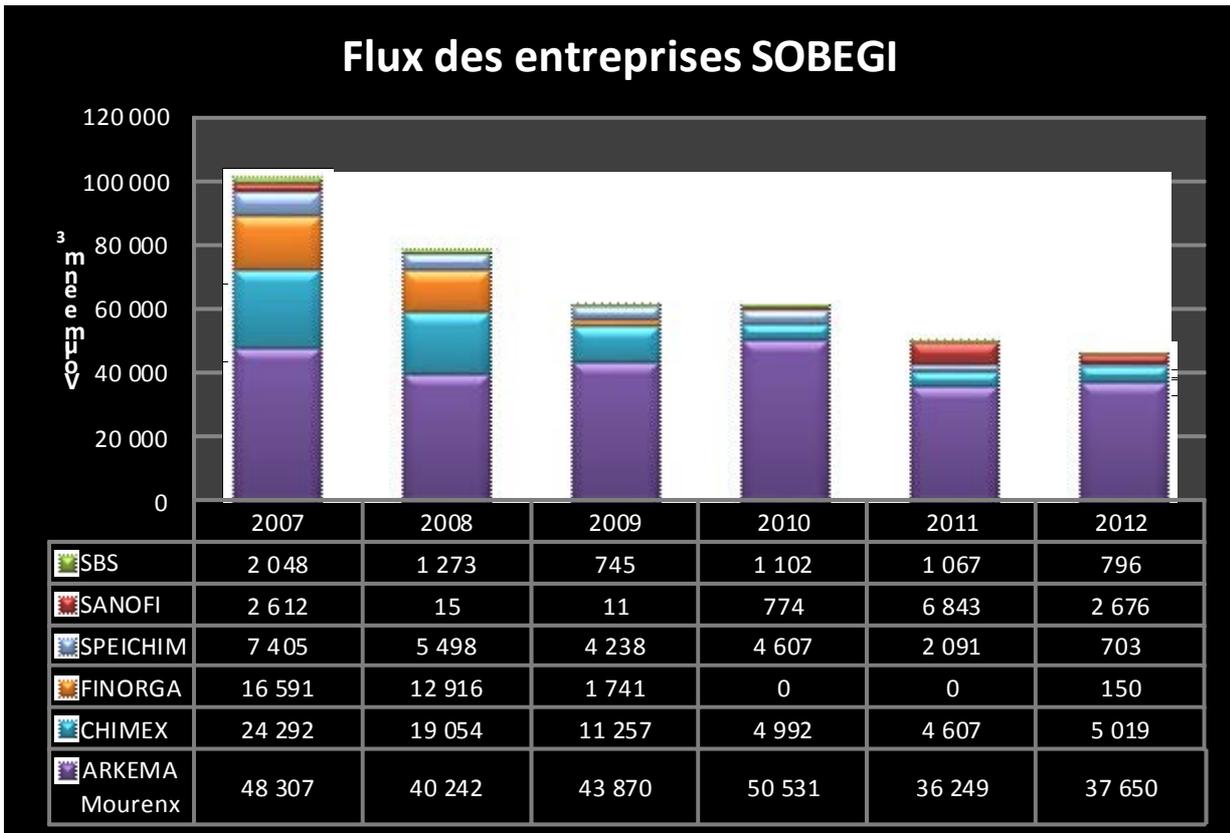


Figure 2 : Evolution des flux contributeurs de SOBEGI par entreprises

3.2 La surveillance de la qualité des effluents

3.2.1 Nature et fréquence des contrôles réalisés

Les effluents des différents flux injectés dans le C4000 font l'objet d'un suivi analytique continu, dont les composantes sont les suivantes :

- Un autocontrôle mensuel sur la qualité des flux injectés,
- Un calage semestriel de l'autocontrôle par un laboratoire indépendant,
- Des contrôles semestriels des effluents chez les différents industriels concernés.

3.2.2 Aspects méthodologiques

3.2.2.1 Les autocontrôles mensuels

Les autocontrôles mensuels sur les flux sur les puits d'injection sont réalisés par le laboratoire TEPF/LCE agréé COFRAC sur plusieurs points de passage des effluents :

- au décanteur D10861 situé à la sortie de la plate-forme de UDL,
- au D40308, où transitent les eaux de condensation de Lacq Profond,
- à la sortie de la plateforme SOBEGI (réalisé par le Service Utilités),
- à ARKEMA Lacq (depuis fin 2009)
- en amont des puits injecteurs LA102 et LA 109

3.2.2.2 Valeurs guide

Des valeurs guide ont été mises en place début 2006 afin d'alerter les exploitants d'éventuelles variations importantes dans la qualité de leurs effluents.

Basées sur une approche statistique et un retour d'expérience de plusieurs années d'observations et de mesures, elles constituent un indicateur supplémentaire de bon fonctionnement des unités.

3.2.2.3 Calage semestriel de l'autocontrôle

Un calage de l'autocontrôle mensuel est effectué tous les 6 mois conformément à l'arrêté préfectoral du 27-02-2006. Ce calage consiste à effectuer des prélèvements simultanés pour réaliser des analyses comparatives entre le laboratoire LCE qui effectue l'autocontrôle et un laboratoire agréé indépendant (Laboratoire des Pyrénées).

Les résultats de ces calages sont rassemblés dans l'annexe 1.

Ils ont révélé qu'il peut exister des différences significatives sur les teneurs mesurées de certains paramètres.

L'analyse des différences ainsi constatées montre quelles ont plusieurs origines :

- L'hétérogénéité de l'échantillon lui-même :

On observe en effet une forte variabilité des teneurs mesurées sur ce type d'eaux usées et ce même si on travaille avec des protocoles et des normes imposés. L'existence de phases différentes et non miscibles dans certains échantillons (MES ou hydrocarbures) augmente ainsi substantiellement les hétérogénéités lors du prélèvement, du transport ou du traitement. Corolairement, la difficulté de pouvoir bien purger les lignes pour des raisons de sécurité et d'hygiène, ne permet pas un balayage suffisant pour fournir des échantillons parfaitement homogènes aux 2 laboratoires.

- Les différences de protocoles ou de matériels utilisés par les différents laboratoires :

Sensibilisé à ce problème particulièrement souligné lors du CLIS de novembre 2008, le LCE a resserré ses relations avec les Laboratoires des Pyrénées, pour travailler de concert sur les protocoles d'analyse et de prélèvement afin de minimiser les écarts constatés.

- Les incertitudes de laboratoire :

Même si le plus grand soin est apporté aux mesures, certains protocoles peuvent occasionner des incertitudes qui pour un même échantillon et une même méthode peuvent atteindre jusqu'à 30 % sur certains paramètres.

3.2.2.4 Contrôles trimestriels chez les divers clients de la plate-forme

Ils sont effectués sur chaque installation, conformément à l'arrêté préfectoral en vigueur.

Les analyses sont assurées par un laboratoire agréé et leurs résultats sont mis à disposition de la DREAL par les exploitants.

3.2.3 Résultats du suivi analytique sur les eaux injectées

Les résultats du suivi analytique sont présentés à l'2 sous la forme de chroniques d'évolution des différents paramètres, regroupées en planches différentes pour en faciliter la lecture.

Les commentaires sur ce suivi sont les suivants :

| Paramètre suivi | Evolution sur la période 2002-2006 |
|---|--|
| Planche 1 : Produits pouvant avoir un impact sur la matrice du réservoir | |
| <i>Matières en suspension (MES)</i> | <p>Le niveau des MES montre des variations de grandes amplitudes. Ces fluctuations sont le reflet du fonctionnement des diverses unités (fabrications par batch) et des arrêts ou démarrage des divers ateliers.</p> <p>On notera également que certaines valeurs anormales venant de SOBEGI peuvent être dues à un biais de mesure, certains sels dissous précipitants lors du refroidissement préalable à l'analyse (voir plus loin).</p> |
| <i>Salinité</i> | Le niveau de salinité dans le fluide injecté est globalement contrôlé par celui de SOBEGI. |
| <i>Chlorures</i> | <p>Dans les eaux SOBEGI, chlorures d'ammonium et de sodium ont des teneurs importantes et stables, elles apportent l'essentiel des chlorures réinjectés.</p> <p>Les baisses constatées au niveau des eaux des puits injecteurs peuvent être expliquées par une variation de la dilution des eaux de SOBEGI avec les différentes eaux injectées.</p> |
| <i>pH</i> | <p>Le pH des eaux de SOBEGI est stable (pH à 8 environ) en raison de leur neutralisation.</p> <p>Les eaux de condensation ont-elles aussi un pH stable autour de pH 5,5 à 6</p> <p>Suite à une neutralisation insuffisante, les eaux d'ARKEMA Lacq montrent souvent des pH plus bas que prévus ($4 < \text{pH} < 6$).</p> <p>De par la réduction progressive des flux des eaux sodées (pH élevé proche de 12) venant de TEPF, on note une baisse tendancielle du pH des eaux injectées depuis la dernière période quinquennale.</p> |
| Planche 2 : Les sels d'acides organiques | |
| <i>Formiates</i> | Le plus souvent sous le seuil de détection saufs pics ponctuels venant de SOBEGI |
| <i>Acétates</i> | Teneurs variables dues à des variations dans les eaux SOBEGI et occasionnellement dans les eaux de plateforme de Lacq mais peu de dépassements de la valeur guide. |
| <i>Propionates</i> | Sous le seuil de quantification, deux augmentations ponctuelles dans les eaux de SOBEGI. |
| <i>Oxalates</i> | Sous le seuil de quantification la plupart du temps. Quelques dépassements ponctuels dans les eaux de SOBEGI n'entraînant pas de dépassement dans les eaux injectées |
| <i>Alcalinité</i> | Pas de dépassement des spécifications. |

| Planche 3 : Substances pouvant avoir un effet sur la santé | |
|---|---|
| <i>Hydrocarbures</i> | Teneurs stables jusque fin 2008 autour de 1%. Depuis début 2009, augmentation de la moyenne des teneurs. On notera que la difficulté à obtenir régulièrement des échantillons homogènes (souvent biphasiques) altère la représentativité des dosages HC. |
| <i>Cyanures</i> | Les variations des seuils de détection dépendent des dilutions opérées pour mener les analyses. |
| <i>Phénols</i> | Comme pour les cyanures, la limite de détection de la méthode d'analyse dépend de la dilution de l'échantillon qui est rendue nécessaire par la présence de sulfures qui perturbent la mesure. |
| <i>H₂S</i> | Stabilité des teneurs mesurées sur la période. |
| Planche 4 : Composés soufrés | |
| <i>Mercaptans (RSH)</i> | Relative stabilité des teneurs sur la période. |
| <i>Sulfates</i> | Les teneurs en sulfates des eaux de SOBEGI sont plus élevées. La baisse relative des flux de SOBEGI entraîne une baisse significative des teneurs en sulfates dans les eaux injectées sur la période. |
| <i>Sulfites</i> | Ils proviennent essentiellement des eaux de SOBEGI. Teneurs globalement stables sur la période. |
| <i>Thiosulfates</i> | Teneurs essentiellement liées aux eaux de la plate-forme TEPF et de SOBEGI. Quelques dépassements sur la période. |
| Planche 5 : Composés azotés | |
| <i>Azote total</i> | La teneur en azote est globalement fixée par les eaux de SOBEGI. On note peu de dépassements. |
| <i>Ammonium</i> | Teneurs fixées par SOBEGI, rien à signaler à part quelques dépassements. |
| <i>Nitrates</i> | Quelques pics sur les eaux de SOBEGI. |
| <i>Nitrites</i> | Très faibles teneurs |
| Planche 6 : Cations (alcalins, métaux) | |
| <i>Baryum</i> | Analyses régulières depuis février 2006. Valeurs inférieures aux limites de détection |
| <i>Fer</i> | Deux dépassements sur la période. Changement de seuils de détection en 2010. |
| <i>Magnésium</i> | Quelques dépassements entre 2008 et 2010. Plus de dépassement depuis l'été 2010. |
| <i>Calcium</i> | Valeurs globalement imposées par les eaux de SOBEGI, rien de particulier. |
| <i>Strontium</i> | Valeurs le plus souvent sous le seuil de détection. Dépassements en septembre 2008, janvier 2009 et avril 2013. |
| <i>Potassium</i> | Niveau fixé par SOBEGI. Baisse significative des teneurs depuis avril 2009. |

Les résultats du suivi qualitatif des effluents montrent que les paramètres analysés ont été globalement maîtrisés. Au niveau des tendances, on notera :

- Une baisse tendancielle du pH due en partie à un défaut de neutralisation chez ARKEMA et à la diminution du flux d'eaux sodées.
- Des pics d'hydrocarbures décelés suite à des incidents survenus sur certaines unités et à des difficultés d'échantillonnage.

On notera toutefois que des dépassements ponctuels des valeurs guides ont été constatés sur certains paramètres. L'analyse de ces dépassements montre qu'ils reflètent le plus souvent des incidents ponctuels et non une dérive structurelle du fonctionnement des unités.

3.2.4 Rappel des faits marquants ayant pu avoir une influence sur la qualité des effluents injectés

Année 2007 :

Pendant l'année 2007, les flux d'injection ont alternés sur les puits injecteurs LA102 et LA 109 en fonction des nettoyages de filtres et des interventions sur le réseau.

A la suite du percement de la canalisation reliant SOBEGI à Lacq, les effluents biodégradables de la plateforme de Mourenx ont été intégrés au flux SOBEGI et dirigés vers le C4000. Cette situation prévue pour une période de 6 mois en 2007 a été compensée en volume par un effort plus important de SOBEGI et de ses clients pour ségréguer les eaux et maîtriser globalement les volumes d'eau injectés dans le C4000.

On note également en novembre 2007 le détournement temporaire des eaux des gisements de Lacq et de Pécorade vers le C4000 en raison de travaux sur le dispositif d'injection dans Lacq supérieur (LA20).

Année 2008 :

Pendant l'année 2008, le dispositif C-4000 a fonctionné indifféremment sur les puits injecteurs LA 102 et LA 109 en conformité avec l'arrêté préfectoral.

On y a relevé plusieurs évènements pouvant avoir une incidence sur la qualité des eaux injectées :

- 31/01/2008 et 20/06/2008 : pompage des boues dans D 10861 pour évacuation et traitement extérieur suite à des problèmes d'échantillonnage.
- 17 et 20/05/2008 : échange des vannes de subsurface des puits LA 109 et 102.
- 17/06/2008 : purge de l'unité DMDS (MM) : effluents mis sur le réseau C4000
- 25/06/2008 : arrêt de l'unité de désaromatisation ARKEMA : Purges de gaz acide vers le réseau C4000.
- 21/07/2008 : incident sur le rebouilleur de désulfuration 12 C 203 percé. Envoi vers le réseau C4000.
- 25 au 28/10/2008 : démarrage de la désulfuration T12, envoi d'eaux polluées par concentration DEA vers le C4000.
- 6/11/2008 : envoi eau + hydrocarbures depuis l'unité de désaromatisation du gaz acide ARKEMA vers le C4000.
- 19/11/2008 : effluent SOBEGI prenant une teinte rouge (due au sulfite de fer) en provenance de Chimex (MES).
- 28 au 31/12/2008 : envoi des eaux des gisements de Pécorade et Lacq Sup vers C4000 pour intervention LA 20 (puits colmaté).

Année 2009 :

Depuis septembre 2009, le flux ARKEMA Lacq a été rajouté au programme d'analyse.

Les évènements répertoriés pendant l'année 2009 sont les suivants :

- du 01 au 27/01/2009, injection dans le C4000 des eaux de gisement de Pécorade et Lacq sup suite au bouchage du puits LA 20 (sulfate de baruym).
- du 23/02 au 11/03/2009, by-pass du décanteur D 10861 (sortie plate-forme Lacq) pour cause de visite quinquennale.
- le 23/04/2009, purges fond de la colonne C 8609 et lavage de C 8608 de l'unité Méthyl Mercaptan.
- les 18 et 19/06/2009, purges fond de la colonne C 8608 (Méthyl Mercaptan) (montée DCO sur réseau Bio).

Année 2010 :

Hormis les périodes d'indisponibilité d'un puits pour cause de test, nous avons scindé les flux en dirigeant les eaux industrielles de SOBEGI sur LA 109 et celles de la plateforme UDL sur LA 102 .

Pour la plupart des flux, il a été effectué 2 analyses par mois. On peut noter les points suivants :

- Flux ARKEMA Lacq :

Problèmes de fonctionnement de la neutralisation entraînant de nombreuses valeurs de Ph<6 particulièrement les 28/01, 23/02, 11/05, mois de juillet, août, septembre, octobre. Il a été demandé à ARKEMA de fiabiliser sa neutralisation.

Présence d'hydrocarbures à taux élevé le 24/03/11 (1,85 % volume) et le 9/12 (50 %) et de phénol surtout les 25/11, 9/12 et 23/12 (10 mg/l). La raison probable de ces anomalies était un fonctionnement incorrect de la régulation de niveau huile/eau de la désaromatisation.

Quelques dépassements de valeur de MES les 11/03 (610 mg/l), 5/08 (2600 mg/l) et 23/12 (830 mg/l).

- Flux D40308 (eaux condensation TEPF) :

Présence d'hydrocarbures à taux élevé le 24/03 (6,3 % volume) et 10/11 (10 % volume) provenant certainement d'un problème de régulation du niveau d'interface huile/eau.

- Flux D10861, mélange flux ARKEMA et flux condensats de torche et eaux sodées TEPF :

Présence d'hydrocarbures à taux élevé les 24/03 (9,25 % volume), 11/05 (8,4 %volume), 24/09 (7 % volume), 25/11 (10 % volume) et 9/12 (9% volume) provenant des flux ARKEMA Lacq et flux D40308.

- Flux SOBEGI (= flux LA 109)

Quelques dépassements de valeur de MES, les 31/08 (1 500 mg/l), 29/09 (1 600 mg/l), 25/10 (1 000 mg/l) et 19/11 (1 600 mg/l) et ceci malgré une filtration poussée chez SOBEGI.

Forte évolution de la salinité due à la part prépondérante du flux ARKEMA (chlorure d'ammonium) : 70 % en 2009 et 80 % en 2010.

Année 2011 :

Hormis les périodes d'indisponibilité d'un puits pour cause de test, comme en 2010 nous avons scindé les eaux industrielles en dirigeant les eaux industrielles de SOBEGI sur LA 109 et celles de la plateforme UDL sur LA 102.

Dans le cours de l'année nous avons effectué sur chacun des 2 puits LA 102 et 109 des mesures comprenant 3 phases :

- un test d'injectivité avec les eaux industrielles de la plateforme Lacq + celles de SOBEGI Mourenx (avec jauges de mesures de pression dans le puits)
- un test d'injectivité à débit stabilisé réalisé à l'aide de moyens de pompage (avec jauges de mesures de pression dans le puits)

- une période de remontée de pression du puits suivie de mesures de pression dans le puits une fois la pression stabilisée.

- Février :

Mise en place d'un monitoring sur l'EA1 (en plus de l'EA0) sur LA 102 et LA 109

- Mars :

Changement de la vanne 2" EA1 sur LA 109

- Avril :

Travaux de maintenance sur les soupapes et réserve FG sur LA 102 et LA 109 dans le cadre des arrêts quinquennaux.

- Mai :

Mise en place de jauges dans le puits de LA 109 en vue test

- Juin :

- Le 01, test injectivité sur LA 109 avec toutes les eaux industrielles
- Le 21 et 22, test injectivité à débit stabilisé sur LA 109
- Le 24, Récupération des jauges dans puits sur LA 109, début remontée de pression du puits.

- Aout :

GPPS dans le puits de LA 109

- Septembre :

- Le 05, Mise en place de jauges dans le puits de LA 102 en vue test
- Le 06, test injectivité sur LA 102 avec toutes les eaux industrielles
- Le 21 et 22, test injectivité à débit stabilisé sur LA 102
- Le 26, Récupération des jauges dans puits sur LA 102, début remontée de pression du puits

- Octobre :

- Le 07,10,21,25,28, Nettoyage filtre sur LA 109
- Le 20, mise en service de la nouvelle cellule HT

Année 2012 :

- Flux ARKEMA Lacq :

En raison d'une neutralisation déficiente, la valeur du pH reste bas et varie entre 4 et 6.

Quelques fortes valeurs de MES (5900 et 7900 mg/l) en février et mars 2012.

Présence ponctuelle d'hydrocarbures issus de la désaromatation le 31/05/12 et 1000 mg/l le 23/07/12.

- Flux D40308 (eaux condensation TEPF) :

Flux très stable en général (PH ~ 6) avec des caractéristiques similaires.

- Flux D10861 :

De par sa composition (mélange des eaux ARKEMA et des condensats de torche et des eaux sodées TEPF) ce flux montre un pH plutôt acide lors du fonctionnement d'ARKEMA et basique lors de l'arrêt d'ARKEMA (de mars et avril 2012).

A signaler des concentrations élevées d'hydrocarbures le 12 avril (8,2% volume), le 16 décembre (9%) suite à un mauvais fonctionnement du niveau du décanteur 60 m³ et des taux de MES élevés le 20 décembre (800 mg/l) 8 novembre (620), 15 mars (540), 2 février (640).

- Flux SOBEGI

Ce flux a montré une grande variabilité du fait qu'il est représenté à près de 80 % par le flux ARKEMA ATG (chlorure d'ammonium), cette unité ayant tournée épisodiquement cette année 2012.

Quelques cas de valeurs élevées de MES le 16 janvier et le 28 février (580 mg/l), le 29 mars (1 200 mg/l), le 25 avril (690 mg/l), 15 mai (1100 mg/l), 26 juin (1500 mg/l), 9 novembre (670 mg/l), 23 novembre (680 mg/l).

Malgré une filtration performante à 180 µm du flux sortant de SOBEGI et étant donné le protocole analytique qui prévoit une température d'analyse de 105 °C, il est probable que ces dépassements soient en fait liés à la présence de sels reprecipités lors de la baisse de température et non à un problème réel de MES.

3.3 Étude des solutions alternatives à l'injection au C4000

Cette étude a été réalisée de mi 2010 à fin 2012 au périmètre des eaux industrielles injectées en 2010 et à celui prévisible à partir de 2014.

Le projet était composé de quatre phases :

- phase 1 : caractérisation des effluents injectés dans le C4000;
- phase 2 : traitabilité des effluents par la STEB (station de traitement des eaux biodégradables);
- phase 3 : évaluation de prétraitements permettant d'améliorer la traitabilité par la STEB;
- phase 4 : étude des possibilités de valorisation des effluents.

L'étude a conclu à une traitabilité des effluents par la STEB limitée, particulièrement pour les effluents salins qui constituent l'essentiel des eaux industrielles injectées au C4000. L'évaluation des possibilités de valorisation de ces effluents salins par des procédés complémentaires en aval des procédés existants n'a pas permis d'identifier de filière qui ne soit pas très pénalisante du point de vue technico-économique.

Cependant, si il apparaît que la majorité en volume des flux doivent pour ces motifs continuer à être injectés, certains industriels se sont engagés à mettre en place des programmes de réduction, voire de suppression des injections.

L'administration a indiqué qu'il sera tenu compte de ces évolutions et qu'un arrêté modificatif sera pris à cet effet.

4 Les opérations sur les puits d'injection

4.1.1 Opérations de Work Over

Aucune intervention de Work Over pendant la période 2007-2012.

4.1.2 Interventions sur les filtres

La maintenance du dispositif d'injection dans le C4000 comprend en particulier le nettoyage et le changement des filtres.

De 2007 à 2009, les flux mélangés étaient injectés en alternance sur les puits LA102 et LA109.

Depuis l'année 2010, la séparation des flux des plates-formes de Lacq et de SOBEGI a clairement montré que les colmatages de filtres provenaient plus particulièrement du flux issu de la plate-forme de Lacq.

| LA102 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Janvier | 1 | | 1 | 4 | 1 | 3 |
| Février | 1 | | | 5 | 3 | 2 |
| Mars | 1 | | 1 | | 1 | 5 |
| Avril | | | | | 2 | 4 |
| Mai | | | 1 | 3 | 5 | 3 |
| Juin | 1 | | | 4 | 2 | 3 |
| Juillet | | | | 1 | 3 | 1 |
| Août | | 1 | | | 3 | |
| Septembre | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| Octobre | 1 | | 1 | 1 | | 6 |
| Novembre | | | | 1 | | 4 |
| Décembre | | | 4 | 2 | 3 | 6 |

Tableau 2 : Interventions sur les filtres LA102

| LA109 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Janvier | | | 2 | | 1 | 1 |
| Février | 1 | | | 1 | | 1 |
| Mars | 1 | | 1 | | | 1 |
| Avril | | | 1 | | | |
| Mai | | | | | 3 | |
| Juin | 1 | | 1 | | 2 | |
| Juillet | 1 | | | | | |
| Août | | 1 | 1 | | | 1 |
| Septembre | 2 | | | 1 | 4 | |
| Octobre | | | | | | |
| Novembre | | | | | 5 | |
| Décembre | 1 | | 2 | | 2 | 2 |

Tableau 3 : Interventions sur les filtres LA109

4.1.3 Le remplacement du pipe de transfert des eaux biodégradables de SOBEGI

Suite au perçage en 2006 de la canalisation de transfert des eaux biodégradables de SOBEGI, autorisation a été demandée au Préfet de pouvoir mélanger les eaux biodégradables aux flux destinés à l'injection dans le C4000 pendant la durée des travaux de remplacement du pipe.

Cette situation prévue initialement pour une période de l'ordre de 6 mois en 2007 a été compensée en volume par un effort plus important de SOBEGI et de ses clients pour ségréguer les eaux et maîtriser globalement les volumes d'eau injectés dans le C4000.

C'est ainsi que les débits totaux de SOBEGI vers le C4000 ont été ramenés de 111 000 m³ en 2006 à 85 000 m³ pour l'année 2008.

4.2 Le contrôle des installations de surface et du réseau de collectes

Le contrôle des installations de surface est effectué par le Service Inspection et Intégrité des Installation de TEPF, avec la fréquence suivante :

| Type de contrôle | Périodicité |
|--|---|
| Gammagraphie des têtes de puits et du réseau de collectes | Contrôle partiel annuellement Total tous les 5 ans |
| Mesure par ultra sons des installations de surface et du réseau de collectes | Campagne annuelle |
| Mesures protection cathodique des puits et du réseau de collectes | En continu, campagne de mesure annuelle |

Tableau 4 : Périodicité des contrôles des installations de surface et du réseau de collecte

Ce contrôle est décliné sous la forme d'un échéancier par tâches dont le respect est lui-même contrôlé annuellement par la DREAL Aquitaine.

| Type d'installations | Équipement | Gamme de contrôle | Fréquence (mois) |
|----------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------|
| LA102/LA109 | Vannes de tête de puits | Contrôle Gamma Partiel | 12 |
| | | Contrôle Gamma Complet | 60 |
| | | Visite Extérieure (visuel) | 12 |
| | Ligne de production | Contrôle Épaisseur (US) | 12 |
| | | Visite Extérieure (visuel) | 12 |
| | Ligne de Torche | Contrôle Épaisseur (US) | 12 |
| | | Visite Nez De Torche (visuel) | 72 |
| | | Contrôle Des Haubans | 12 |
| | | Visite Extérieure (visuel) | 12 |

| Type d'installations | Équipement | Gamme de contrôle | Fréquence (mois) |
|--|--|---|------------------|
| | Protection cathodique des cuvelages ou casings | Contrôle Partiel (1 ^{er} semestre) | 12 |
| | | Contrôle Annuel (2 nd semestre) | 12 |
| Canalisations (4" et 8") | Protection cathodique canalisation (y compris regards) | Contrôle Partiel (1 ^{er} semestre) | 12 |
| | | Contrôle Annuel (2 nd semestre) | 12 |
| Traversée Gave sur passerelle | | Visite Extérieure (visuel) | 12 |
| INSTALLATIONS DE SURFACE SOUS PRESSION | La capacité D10861 | Contrôle Épaisseur (US) | 72 |
| | | Requalification (APAVE) | 144 |
| | | Inspection Périodique interne (arrêt) | 72 |
| | | Visite Extérieure (visuel) | 12 |

Tableau 5 : échancier des contrôles par types d'installations

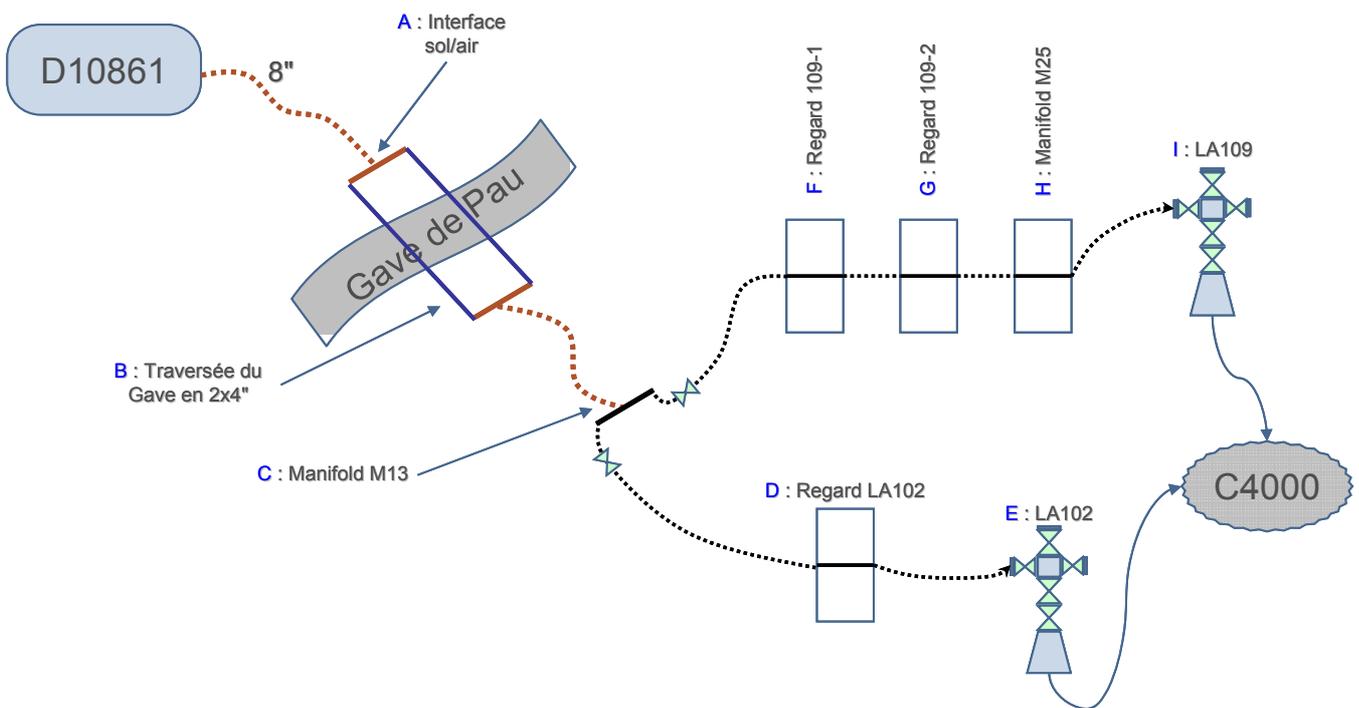


Figure 3 : Schéma des installations soumises à contrôle de corrosion

4.2.1 Les contrôles par gammagraphie

L'ensemble des vannes et duses des têtes de puits a ainsi été contrôlé par gammagraphie. Sur la période, aucun défaut pénalisant n'a été décelé.

| Gammagraphie | Têtes de puits | Réseau de collectes |
|--------------|--|---|
| 2007 à 2009 | Lors des contrôles opérés sur l'ensemble des vannes et des duses constituant les têtes de puits de LA 102 et LA109, l'interprétation des clichés n'a révélé ni corrosion ni défaut | Observation de traces de corrosion non évolutives sur R109-1 et R109-2 |
| 2010 | | Lors du contrôle des canalisations du réseau Eaux polluées entre l'Usine de Lacq et les puits LA 102 et LA 109, des zones de corrosion ont été observées par petits cratères en plusieurs lieux. |
| 2011 | | En juin 2011, l'inspection visuelle externe (PCS / R1) ainsi que les mesures d'épaisseur des collectes en zone aérienne, dont celles traversant le Gave de Pau ont été réalisées (campagne US par APAVE sur 30 points). |
| 2012 | | Aucune anomalie mettant en cause l'intégrité des collectes n'a été détectée |

4.2.2 Les contrôles par ultrasons

Les contrôles effectués par ultrasons permettent de comparer les épaisseurs mesurées avec l'épaisseur nominale des équipements

| Ultra-sons | Installations de surface | Réseau de collectes |
|------------|--|---|
| 2007 | Les campagnes annuelles de mesures par ultrasons des coudes des installations de surface des puits LA 102 et LA 109 n'ont pas révélé de perte d'épaisseur ni de défaut notable | Mise en place d'un revêtement SVR (D=Stratifié Verre Résine sur les pipes de la passerelle P3 bis |
| 2008 | | |
| 2009 | | Passerelle P3 bis, pas de contrôle d'épaisseur mais renforcement des ancrages et remplacement des câbles porteurs |
| 2010 | | Traces de corrosion observées sur les 2 collectes 4 " de la passerelle P3 |
| 2011 | | Les mesures n'ont pas révélés de sous-épaisseurs de parois (en dessous de l'épaisseur de calcul) aux points mesurés. Aucune anomalie mettant en cause l'intégrité des collectes n'a été identifiée. |
| 2012 | | |

4.2.3 Les contrôles de la protection cathodique

Les relevés des paramètres enregistrés en continu par le système de télésurveillance Schneider n'ont pas montré de valeur anormale des courants de protection vers les casings puits et les canalisations ainsi que les Joints isolants.

Les équipements de Protection Cathodique sont conformes aux procédures INSP.

Bilan Gisement

5.1 Observations sur le réservoir de Lacq Profond

5.1.1 Description des moyens

5.1.1.1 Mesures de pression

Pour ce gisement (Figure 4), et ce depuis le début de la production (avril 1957), la pression est suivie régulièrement :

- Mesures sur les puits producteurs au moyen de GPPS (Gradient par Paliers de Pression Statique). Ces mesures sont faites selon les besoins et lors des arrêts réglementaires. 20 mesures ont été effectuées sur la période 2007-2012, dont 6 lors de l'arrêt de 2011 (
- Tableau 6), pour avoir des données de pression sur une large partie du champ.
- Mesures sur le puits observateur, LA-119, situé à L'Ouest du top de la structure (en vert sur la figure 2). Le suivi est assuré par la mise en place de deux jauges à mémoire descendues dans le puits pour 2 mois puis remontées à l'issue de cette période. Les périodes d'absence des données de pression de fond sont généralement liées aux défaillances des jauges qui sont soumises à des contraintes très sévères¹. En 2012, TEPF n'a pu disposer de mesures continues au puits LA119 entre le 28/04/2012 et le 07/11/2012, la société prestataire de ce service ne souhaitant plus acquérir ces mesures. Les mesures continues sont de nouveau assurées depuis le 08/11/2012.
- Mesures sur les injecteurs LA102 et LA109 (puits en bleu ciel sur la Figure 4, au sud).

Toutes les données de pression sont ramenées à la cote de référence du gisement à -3700 mV/NM.

5.1.1.2 Suivi de la composition du gaz

Une à deux analyses annuelles sont effectuées pour suivre l'évolution de la composition du gaz.

5.1.1.3 Autres mesures de surveillance

D'autres mesures et études ont été effectuées (monitoring sismique, études géochimiques, tests d'injectivité) et sont présentées dans la section suivante.

¹ Les jauges sont couramment endommagées par l'effet du CO₂, qui diminue l'étanchéité au niveau des joints, par l'H₂S très corrosif pour l'électronique interne, ainsi que par la température élevée de 125°C à laquelle elles sont soumises.

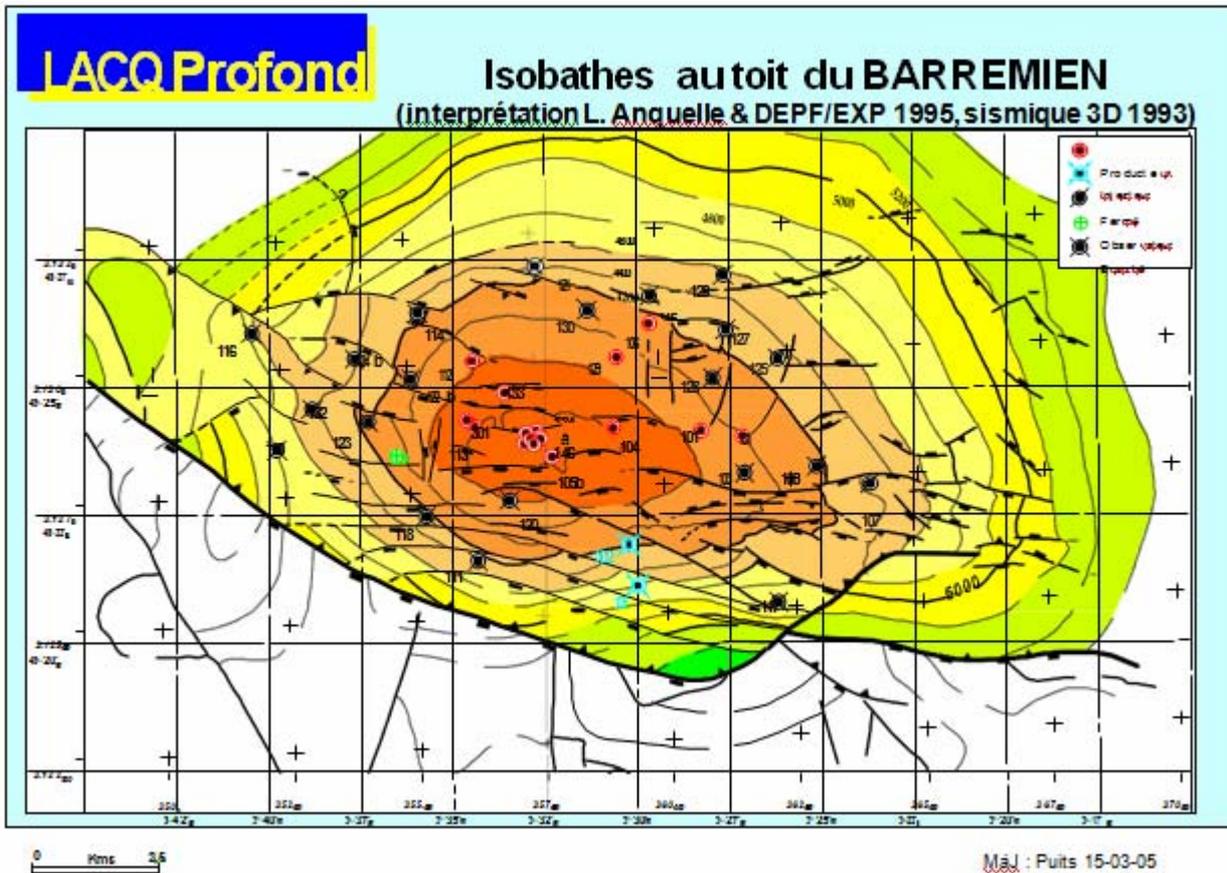


Figure 4: Isobathes au toit du réservoir de Lacq Profond

5.1.2 Analyses des acquisitions 2007- 2012

5.1.2.1 Evolution de la pression

L'évolution de la pression a fait l'objet d'un suivi régulier à partir des mesures effectuées sur les puits situés au centre ou à la périphérie du gisement (Figure 5).

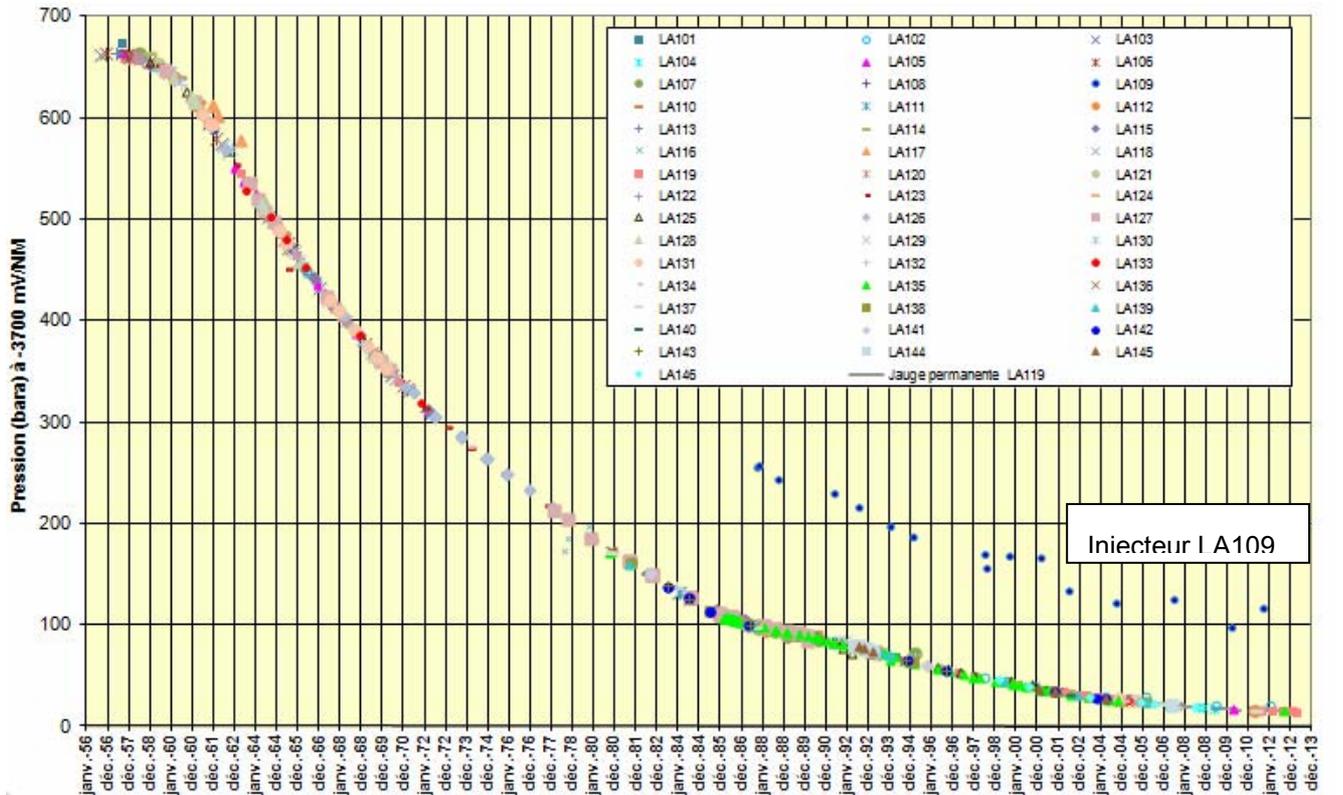


Figure 5: Historique des mesures de pression de 1957 à l'actuel

Depuis 2001, LA119 est utilisé comme observateur de la pression (mesures presque en continu) : la Figure 6 montre l'évolution de la pression de Lacq profond depuis 2005.

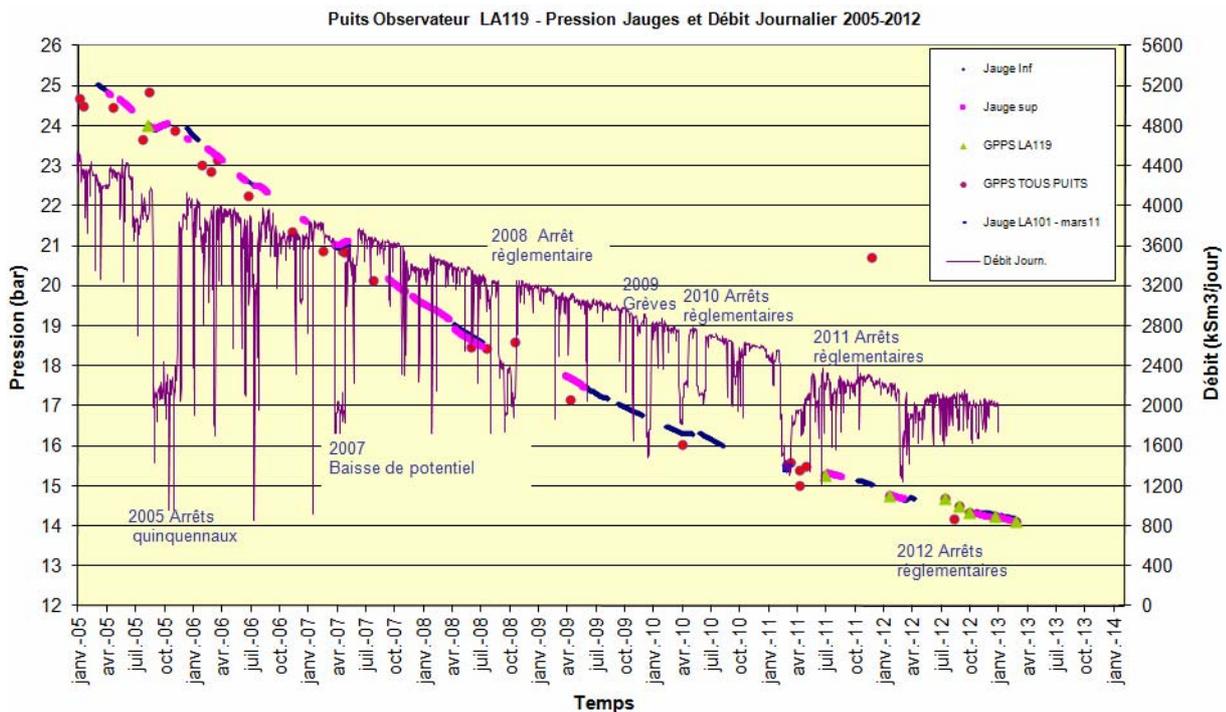


Figure 6: Pressions à -3700 mV/NM entre 2005 et l'actuel

Les mesures GPPS (ou assimilées) effectuées sur la période 2007-2012 sont répertoriées dans le Tableau 6. L'incertitude prise en compte pour ces mesures est (+/- 0.2 bar).

Pour la période 2007-2012, on constate ainsi que malgré la distance entre les puits du cluster et les puits périphériques (4 à 4.5 km), le différentiel de pression entre eux n'excède pas 0.6 bar. Le réservoir quant à lui montre un ralentissement de la chute de pression

- Ce comportement dynamique du réservoir de Lacq, assez homogène, s'explique par l'intense fracturation du réservoir, avec des perméabilités de l'ordre du Darcy dans le réseau de fractures.
- Le ralentissement de la chute de pression est lié à la réduction du soutirage et est conforme aux prévisions annoncées par le modèle (cf §3.2.3).

Des mesures ont été effectuées en 2012 sur le puits LA-135 qui a été sélectionné comme futur puits d'observation de la pression dans le cadre du projet « Lacq Cluster Chimie 30 »².

Ces mesures démontrent que le puits LA135 est soumis à l'interférence des puits du cluster mais que l'écart de pression entre LA-119 et LA-135 est faible (environ 0.4 bar) conformément aux prévisions du modèle.

² LCC30 : production prévue uniquement par 5 des puits du Cluster d'Arance

| | | P statique en bara | |
|------------|--------|--|------------|
| 22/02/2007 | LA139 | 20.9 +/- 0.2 | Apex |
| 26/04/2007 | LA137 | 20.9 +/- 0.2 | Apex |
| 05/05/2007 | LA144 | 20.9 +/- 0.25 | Apex |
| 01/08/2007 | LA136 | 20.1 +/- 0.2 | Apex |
| 11/06/2008 | LA146 | 18.5 +/- 0.2 | Apex |
| 31/07/2008 | LA104 | 18.5 +/- 0.2 | Est |
| 29/10/2008 | LA104 | 18.6 +/- 0.2 | Est |
| 22/04/2009 | LA104 | 17.1 +/- 0.2 | Est |
| 14/04/2010 | LA105 | 16.0 +/- 0.2 | Sud-Est |
| 14/03/2011 | LA101 | 15.5 +/- 0.2 | Est |
| 29/03/2011 | LA112 | 15.6 +/- 0.2 (corrigé LDL - O LAP réduit) | Nord-Ouest |
| 26/04/2011 | LA129 | 15.4 +/- 0.2 | Nord-Est |
| 27/04/2011 | LA137 | 15.0 +/- 0.2 | Apex |
| 17/05/2011 | LA101 | 15.5 +/- 0.2 | Est |
| 18/07/2011 | LA119 | 15.3 +/- 0.2 | Ouest |
| 06/02/2012 | LA119 | 14.8 +/- 0.2 | Ouest |
| 02/08/2012 | LA119 | 14.7 +/- 0.2 | Ouest |
| 30/08/2012 | LA135* | 14.2 +/- 0.2 | Apex |
| 18/09/2012 | LA119 | 14.5 +/- 0.2 | Ouest |
| 19/10/2012 | LA119 | 14.4 +/- 0.2 | Ouest |

Tableau 6: Résultats des mesures GPPS sur les puits de LAP en 2011 et 2012

5.1.2.2 Fracturation du réservoir

Pendant la période 2007-2012, on ne note aucun changement ou étude nouvelle par rapport à la description faite dans le rapport précédent (se référer au précédent rapport quinquennal).

5.2 Comportement du champ

5.2.1 Observations générales

Pendant les trente premières années d'exploitation, le gisement a eu le comportement classique d'un champ à gaz sans aquifère, comportement caractérisé par une relation linéaire de P/Z en fonction du cumulé de gaz produit, conformément à la loi de Mariotte (Figure 7).

Depuis 1986 (volume cumulé produit, G_p de l'ordre de 200 GSm^3), le « P/Z » s'écarte de la droite établie, avec un ralentissement du déclin de pression par rapport à la prévision.

Ce phénomène est attribué à la baisse du régime de production (Figure 8). Une baisse du taux de soutirage change en effet le régime de pression et peut donner le « temps » aux régions périphériques, plus lointaines et moins denses en termes de fracturation, et non produites par des puits, d'alimenter la région centrale et ses producteurs. De plus, l'importance de la déplétion (plus de 600 bars) peut solliciter des niveaux à faible perméabilité dont la contribution est généralement négligeable sur les gisements plus conventionnels.

Ce phénomène est suivi par des mesures de pression réalisées à l'occasion des arrêts réglementaires ou lors des périodes de réduction de débit, pour ajuster cet influx périphérique.

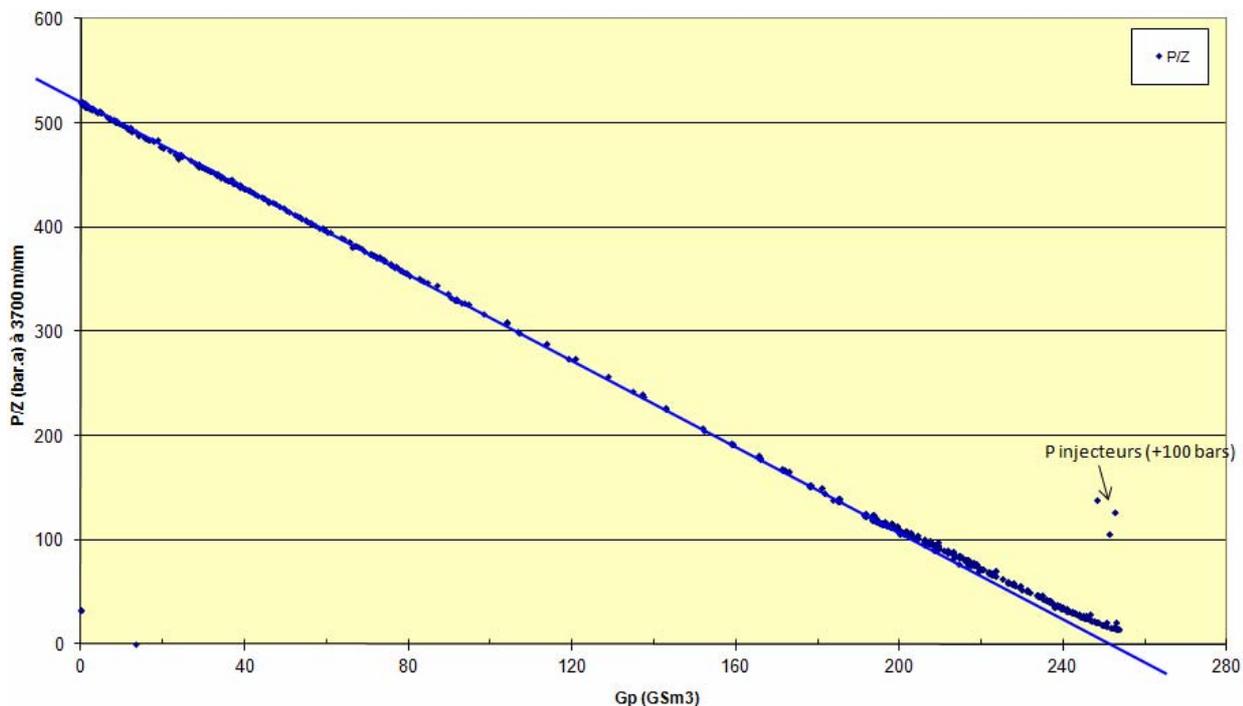


Figure 7: P/Z (bara) à -3700 mV/NM vs Gaz cumulé produit de LAP (origine – 2012)

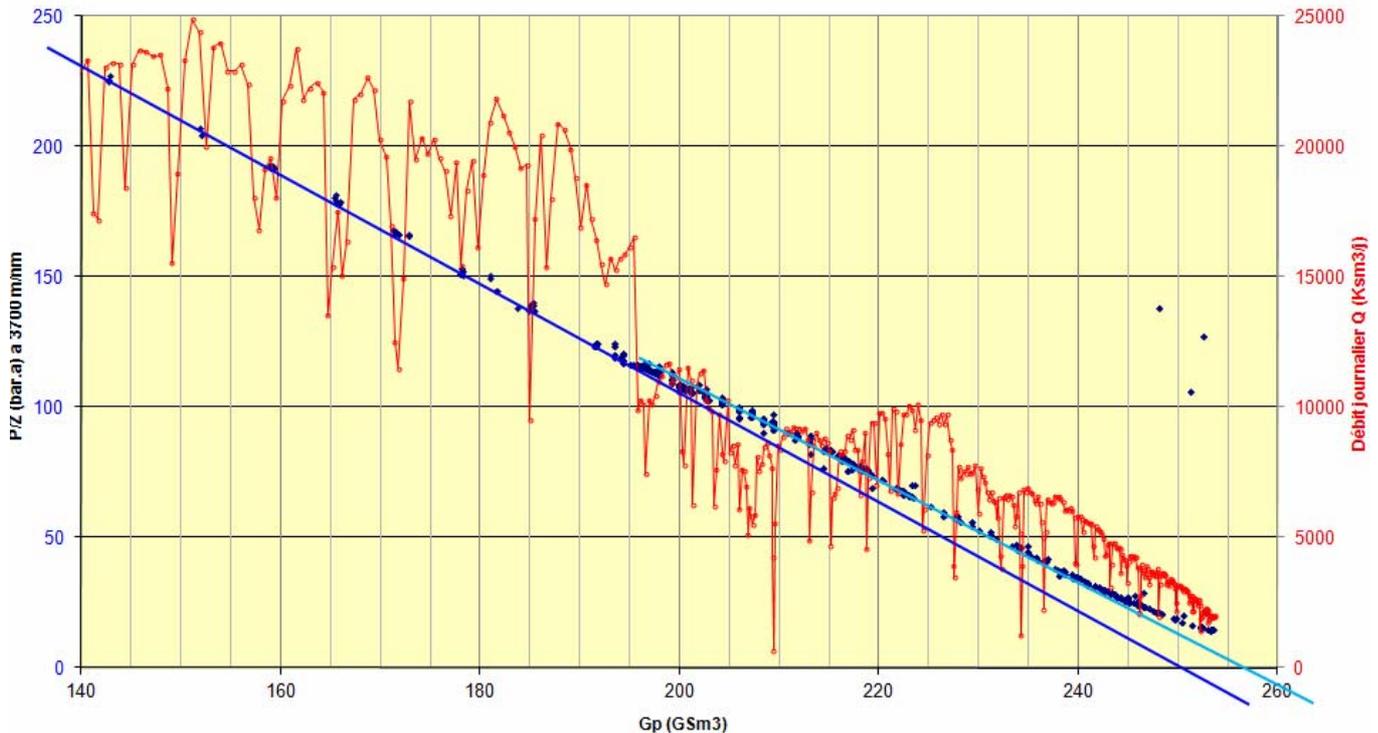


Figure 8: P/Z (bara) à -3700 mV/NM et débit journalier (KSm³/j) vs Gaz cumulé produit de LAP (1978-2012)

5.2.2 Bref historique des modèles précédents

- Une remise à plat de l'ensemble des données avait été entreprise en **1996-1997** (voir section 2.2.3 du dossier de sûreté). Elle avait débouché sur un modèle d'écoulement compositionnel pour restituer la thermodynamique complexe et double porosité afin de représenter les effets et échanges matrice / fracturation. Ce modèle prenait également en compte :
 - l'augmentation de la perméabilité avec la déplétion, qui améliore la productivité globale et, en particulier, l'alimentation de la région centrale ;
 - l'expansion de l'eau connée. Les saturations en eau initiales sont élevées. La déplétion importante a eu pour effet de les augmenter de manière significative, du fait de la compressibilité de la roche et de la différence de mobilité en faveur du gaz ;
 - l'évaporation et le dégazage de l'eau connée, dont l'effet induit sur la pression et les compositions a été montré ;
 - localement, le modèle simule les injections effectuées dans la périphérie sud du gisement, et restitue la surpression de plus de 130 bars mesurée dans cette zone par rapport au reste du gisement. Initialement, ce secteur était en équi-pression avec l'ensemble du gisement (section 3.2.5 du présent document).

- Ce modèle a subi une évolution en **2005** pour intégrer de nouveaux apports de la sédimentologie, raffiner le maillage au centre du champ mais également sur les bords, profitant des performances évolutives des simulateurs. Trois modèles avaient été définis afin de pouvoir encadrer les paramètres géologiques incertains du champ (dits PHI_MIN, PHI_MED, PHI_MAX : PHI_MIN & fermeture à 6100 mV/NM, PHI_MED et fermeture à 5800 mV/NM, PHI_MAX & fermeture à 5350 mV/NM). Le cas de base, qui est le cas médian, permettait de caler de façon très satisfaisante l'historique de production jusqu'en 2006.

5.2.3 Evolutions des modèles ECLIPSE sur la période 2007-2012

- En **2009**, le modèle 2005 a été remis à jour (DGEP/GSR/VDG/RES 10-024 - P. Clament) et un recalage de l'historique a été effectué avec les mesures nouvellement disponibles. Les 3 cas (dits PHI_MIN, PHI_MED, PHI_MAX) y sont traités. L'objectif était de fournir des profils prévisionnels post-2013 pour valider la disponibilité du gaz en quantité suffisante pour le projet "Alimentation Industlacq" (renommé depuis Lacq Cluster Chimie 2030 : LCC30). La zone du LA109 avait alors été laissée de côté (accumulation très réduite, complexité structurale, complexité des phénomènes).
- Suite aux expertises du BRGM en 2009-2010 sur le dossier de demande d'injection des effluents d'Arkema Mont dans le dispositif C4000 et pour répondre aux sollicitations de la DREAL, une nouvelle étude de simulation a été réalisée en **2010** (DGEP/GSR/VDG/RES 10-230) avec pour objectif principal le calage des pressions des puits injecteurs du C4000, notamment au puits LA109, en utilisant comme point de départ le modèle de 2009.

Les conclusions principales des études 2010 étaient les suivantes :

- le secteur du LA109 est partiellement isolé par des failles dont le rejet est du même ordre de grandeur que l'épaisseur du réservoir, ce qui explique l'écart en pression de ce secteur (de l'ordre de la centaine de bars) par rapport au reste du champ (confirmation par modélisation ECLIPSE avec traceurs);
 - l'analyse des pressions statiques démontre également que le puits LA102 est mieux connecté au reste du réservoir (pression au LA102 en ligne avec celles des autres puits);
 - le fluide injecté reste essentiellement en phase liquide et s'engouffre dans les fractures par gravité pour se diriger vers le plan de scellement ;
 - les zones broyées (couloirs de fracturation) jouent un rôle important sur l'injectivité du puits, laquelle reste élevée au cours du temps.
- En **2011**, le modèle dynamique ECLIPSE médian a été repris afin d'améliorer le calage effectué en 2010 et pour intégrer les dernières mesures aux puits producteurs, au puits observateur et aux puits injecteurs. Ce travail, inscrit dans le cadre du projet Lac Cluster Chimie 2030 (LCC30), a permis en particulier de mieux cerner la pression du réservoir et les apports des zones périphériques, éléments identifiés comme primordiaux à étudier pour réduire les incertitudes géosciences associées au projet LCC30.

Considérations volumétriques :

La pression du réservoir est actuellement très basse (15 bar à -3700m/nm) et le modèle utilisé travaille à la limite de ses possibilités compte tenu de l'incertitude qui croît avec la baisse de pression sur :

- 1) le comportement PVT,
- 2) l'impact de la saturation en eau interstitielle,
- 3) la vaporisation de l'eau à très faible pression.

Si ces paramètres peuvent avoir une influence sur le comportement en pression du réservoir, l'élément jugé prépondérant est bien l'alimentation par les zones périphériques à faible perméabilité.

Le calage du ralentissement du déclin de pression, a donc été obtenu en augmentant la contribution en provenance des zones périphériques (volume et perméabilité).

En tenant compte de ces nouveaux éléments, l'accumulation a donc été régulièrement revue à la hausse : l'accumulation du modèle 2011 étant de 272.5 GSm³, soit 1.0 GSm³ de plus que le modèle utilisé pour le précédent rapport quinquennal (271.5 GSm³)

La production cumulée de gaz ayant atteint 253.6 GSm³ au 31/12/2012, le facteur de récupération estimé s'établit donc à 93% (pour une accumulation de gaz de 272.5 GSm³).

Sur la période 2007-2012, 1.26 Millions de Sm³ ont été injectés dans le réservoir de Lacq Profond dans le cadre du C4000 ; avec un volume cumulé d'eau injectée de 7.8 millions de Sm³ au 31/12/2012.

Le pourcentage du volume poreux du gisement concerné par cette injection reste donc négligeable et de l'ordre de 1 %.

Evolution des pressions :

La Figure 9 montre la comparaison des pressions modélisées en conditions réservoir (courbe rouge) avec les mesures, continues ou GPPS, à l'observateur LA119 (croix noires) pour la période 2000 à 2013. Les pressions ont été calculées avec le modèle ECLIPSE 2011 après mise à jour des données historiques jusqu'à fin décembre 2012 et du prévisionnel au-delà. Le calage des données apparaît tout à fait satisfaisant depuis 2009 et le modèle se montre correctement prédictif en 2013.

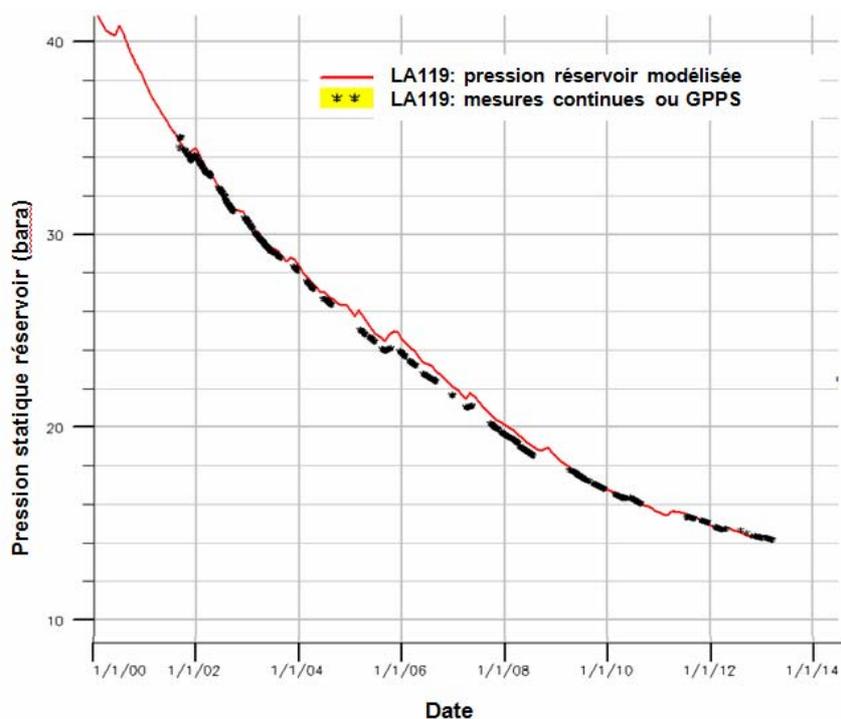


Figure 9: Modélisation ECLIPSE et mesures sur LA119 de janvier 2000 à l'actuel

5.3 L'expertise du BRGM sur le dossier de demande d'injection de ARKEMA-MONT

Suite au dépôt d'un dossier de demande d'injection des effluents sodés d'Arkema Mont dans le dispositif C4000 (2006), l'Inspection des Installations Classées a invité TEPF à demander au BRGM de réaliser une tierce-expertise de son dossier de demande d'autorisation.

L'objectif de cette tierce-expertise consistait à émettre un avis sur ce document, en se prononçant en particulier sur :

- L'analyse des risques liés à l'injection de l'effluent sodé de l'usine d'ARKEMA MONT qui y est conduite, en termes de qualité et d'exhaustivité.
- Les effets de l'injection sur la matrice minérale, en prenant en considération les problèmes de compatibilité avec les autres effluents.
- Le dispositif de surveillance mis en place pour faire face au risque de colmatage de la matrice.
- Les modifications potentielles sur les conclusions de l'étude d'évolution à 10 000 ans réalisée en 2001.

Dans son rapport d'expertise³ réalisé en avril 2009, le BRGM jugeait complète la liste des risques envisagés et la distinction entre les phénomènes non influencés par les modifications et ceux qui nécessitent de nouvelles études globalement pertinente.

En ce qui concernait plus spécifiquement les interactions fluides-matrice, le BRGM estimait toutefois que les études présentées, bien que de qualité, ne reflétaient pas les dernières évolutions techniques en matière de codes de calcul pour justifier le faible impact géochimique de l'injection sur le réservoir.

Le BRGM recommandait ainsi des calculs complémentaires permettant de tenir compte de la circulation des fluides (effluents liquides, gaz).

5.4 Etudes géochimiques des relations fluides injectés-matrice minérale du réservoir (annexe 4)

Suite à l'expertise du BRGM, et après échanges techniques sur le programme complémentaire à envisager, des études complémentaires de modélisations géochimiques ont été proposées par TEPF⁴ puis réalisées en 2011 et 2012.

Les modélisations géochimiques, basées sur une approche par modèles phénoménologiques, y intègrent une dimension transport afin de mieux caractériser la spatialisation des effets de dissolution/précipitation de minéraux dans la matrice et pour quantifier l'impact du facteur thermique⁵ sur les conversions géochimiques.

³ Rapport d'expertise initiale : Avis sur le dossier « Injection des eaux sodées d'Arkema Mont » à Lacq (64). Rapport BRGM/RP-57226 – FR

⁴ C4000 Arkema Mont – Réponses TEPF à la Tierce expertise BRGM. Note GSR09-093, 13 novembre 2009 et

Avis sur les réponses apportées à l'expertise du BRGM dans le dossier « Injection des eaux sodées d'Arkema Mont » BRGM/RP – 58085-FR Février 2010

⁵ La température des eaux injectées est estimée à 50 °C / température initiale du réservoir (avant refroidissement) proche de 140 °C en fond de puits

5.4.1 Etude 2011(rapport n° DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-051 par Pierre Chiquet, daté de novembre 2011).

Cette étude considère l'effet des fluides injectés dans le dispositif C4000 actuel dans deux configurations :

- Les eaux de SOBEGI seules,
- Les eaux en mélange (Lacq profond + Plateforme de Lacq + SOBEGI).

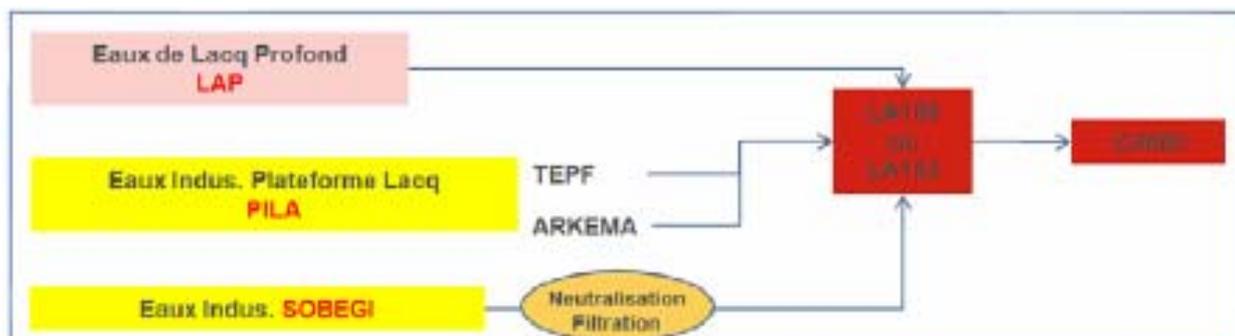


Figure 10: schéma d'injection actuel (étude 2011)

Résultats

Les calculs convergent vers une augmentation homogène de la porosité dans le « Calcaire à algues ». Initialement à 7.5 %, celle-ci atteint, après 40 ans d'injection, 8.4 % pour l'effluent SOBEGI seul et 8.3 % pour le mélange des eaux de condensation de Lacq Profond, de la Plateforme Industrielle de Lacq et de la SOBEGI.

Cet effet est essentiellement attribuable à une légère dissolution de la calcite qui est le minéral dominant dans le « Calcaire à algues ».

Spatialement, les modifications de porosité se concentrent dans une zone particulière et limitée : un couloir drainant l'essentiel du flux sous la forme d'une zone broyée traversant le « Calcaire à algues » et la « Dolomie du Mano ».

A l'échelle du réservoir, ces modifications sont largement pondérées par les faciès matriciels pas ou peu atteints par l'effluent.

5.4.2 Etude complémentaire 2011/2012 (rapport n° DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-052, daté d'avril 2012)

Destiné à simuler les comportements géochimiques dans la configuration d'exploitation 2014 et au-delà, ce complément d'étude considère les effluents « LAP (eau de condensation Lacq Profond) + PILA (eau industrielle de Lacq) + SOBEGI (eau industrielle de Mourenx)» dans le cadre du projet LCC30 avec des compositions différentes des eaux « historiques » précédemment étudiées et des débits plus faibles (valeurs précédentes divisées par 3 en ce qui concerne l'eau de condensation).

Deux scénarios d'injection sont évalués :

- l'injection conjointe de ces 3 effluents par le puits LA109
- l'injection des eaux collectées à Lacq (LAP+PILA) dans le puits LA102 et des effluents collectés à Mourenx per SOBEGI dans le LA109.

Résultats

Quel que soit le scénario envisagé, les calculs convergent vers une légère augmentation de la porosité aux abords des puits injecteurs : initialement estimée à 7.5 %, celle-ci atteint, après 40 ans d'injection, 8.4 % dans le « Calcaire à algues » et 7.6 % dans la « Dolomie de Mano ».

Avec les hypothèses utilisées dans cette étude, notamment pour les surfaces réactives, ces augmentations de porosité restent faibles au regard des volumes injectés et ne présentent pas de risque pour l'intégrité du « Calcaire à algues » et de la « Dolomie de Mano » dans les blocs concernés par les puits LA109 et LA102.

5.5 Analyse de l'évolution de la teneur en H₂S dans le gaz produit

Des analyses compositionnelles sont réalisées deux fois par an depuis 2006 sur plusieurs points d'échantillonnage : puits LA106 (Est), LA112 (Ouest), LA140 (cluster) et une nourrice (D20301) en amont de l'usine qui regroupe tous les gaz sauf ceux de la partie Nord-est.

En 2010, le modèle thermodynamique a été repris afin d'intégrer les compositions livrées par les dernières analyses de gaz. La nouvelle loi médiane de 2010 a été intégrée dans le modèle ECLIPSE de 2011 (Figure 11, courbes continues). Les résultats des mesures de 2007 à 2012 sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau 7).

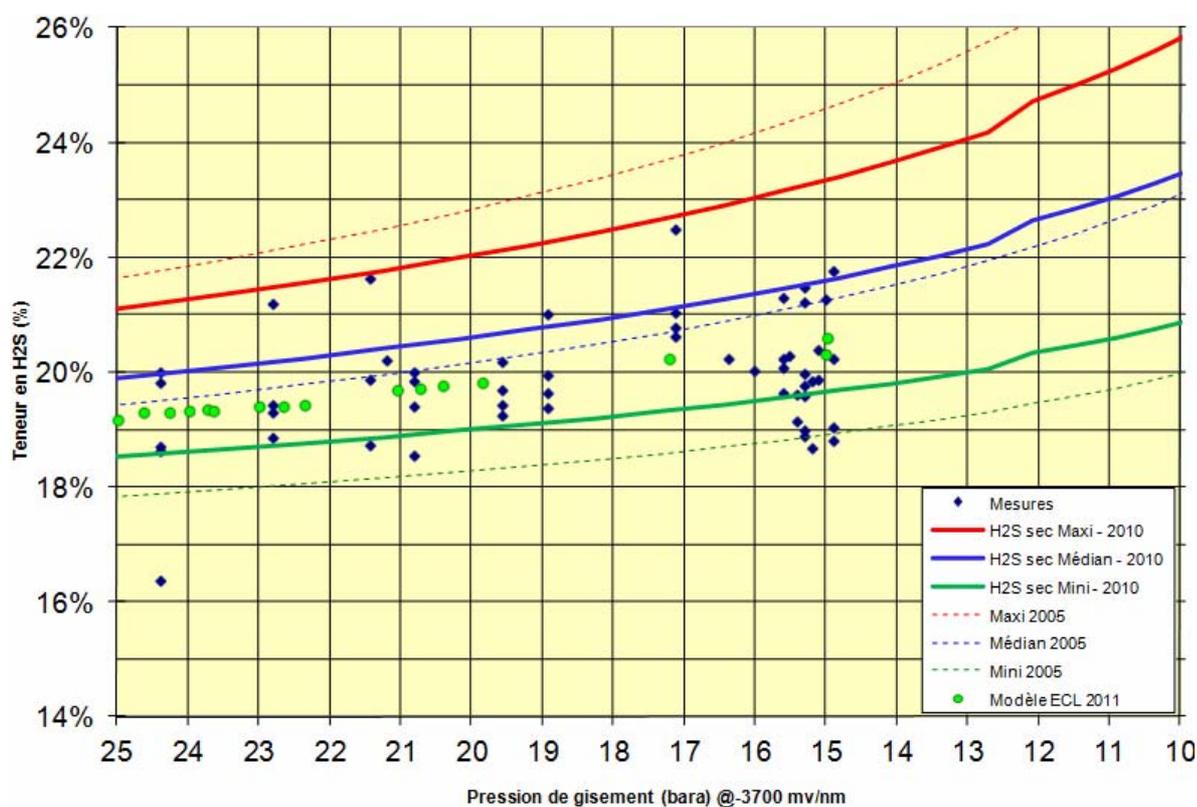


Figure 11: Teneur en H₂S de l'effluent produit en fonction de la pression: mesures et modèles

Tableau 7: Composition du gaz produit (% volumique)

Etude thermodynamique complémentaire :

L'étude thermodynamique de 2005 s'est intéressée à l'évolution de la teneur en H₂S et à des paramètres considérés jusqu'alors comme secondaires mais susceptibles de devenir prépondérants tels que l'effet d'aplatissement lié au dégazage de l'eau interstitielle, à l'évolution de la salinité ou à l'apport d'une zone à déplétion différée, ou l'impact de l'injection d'eau, de son pH et de la présence de tampons dans l'eau injectée.

Suite à cette étude, il avait été finalement jugé que ces paramètres n'étaient vraisemblablement pas prépondérants, tant pour l'H₂S que pour le CO₂.

Une mise à jour de cette étude est envisagée pour expliquer les résultats des mesures de teneur en H₂S qui continuent à suggérer un « aplatissement », la teneur en H₂S mesurée semblant ne plus vraiment augmenter au fur et à mesure que la pression du réservoir décroît. Cette observation est cependant à tempérer du fait de l'apparente dispersion des résultats, ce qui pourrait être en relation avec une incertitude significative de la chaîne prélèvement de l'échantillon - mesure.

A noter cependant que l'évolution de la teneur en H₂S du modèle réservoir restitue correctement le résultat des mesures.

5.6 Acquisitions sur les puits injecteurs

Jusqu'en février 2010, les injecteurs LA102 et LA109 ont fonctionné en injecteurs à tour de rôle: quand l'un sert d'injecteur, l'autre tend alors à se stabiliser en pression).

Depuis cette date, ils fonctionnent plus généralement en simultané (sauf exceptions : fonctionnement alternatif par exemple de fin mai 2011 à début décembre 2011).

Injecteur LA102 : Le découvert se situe entre 3 911 m/TR (soit - 3 811 m/nm) et 4 306 m/TR (soit - 4206 m/nm). La cote de pose des jauges se situe à 3785 m/tr (-3 683.7 m/nm) soit 126 m au-dessus du découvert.

Injecteur LA109 : Le découvert se situe entre les cotes de 4716 m/TR (soit - 4595 m/nm) et 4816 m/TR (soit - 4695 m/nm). La cote de pose des jauges se situe à 3987 m/tr (-3873.2 m/nm) soit 622 m verticaux au-dessus du découvert. Une seule zone d'injection semble identifiée à partir de la cote de 4811 m/TR où sont apparues les partielles qui sont devenues totale à partir de la cote de 4813.9. Dans le cas de ce puits, la zone à perte correspond donc à la base du puits : 4811 – 4816 m/TR.

Mesures GPPS aux injecteurs :

Les puits injecteurs du C4000 présentent un comportement particulier. Après l'arrêt de l'injection et fermeture du puits, il faut attendre le rééquilibrage des phases eau / gaz dans et aux abords du puits pour avoir une pression en tête stable et par conséquent une mesure de pression réservoir fiable. La mesure de pression statique est donc réalisée une fois la pression de tête stabilisée, signe d'une remise sous gaz du puits.

Au cours de l'exploitation, le temps de stabilisation est devenu de plus en plus long (peut être en relation avec la déplétion du réservoir) et une procédure opérationnelle a été implantée pour l'accélérer. Un volume de gaz doux équivalent à plusieurs volumes du puits est injecté après enregistrement du fall-off pour chasser l'eau dans le réservoir. Le GPPS est ensuite enregistré quand la pression en tête de puits est stabilisée.

Les pressions de fond, acquises lors de GPPS sur la période 2007-2012, sont fournies dans le Tableau 8.

NB : La valeur de pression statique donnée à 97.9 bara pour LA109 en 2010 a par contre été jugée comme non totalement stabilisée.

Tests d'injectivité :

Dans le cadre du monitoring des injections sur le C4000, des tests d'injectivité ont été effectués sur la période 2006-2011 avec l'objectif de suivre l'intégrité du dispositif, du réservoir et de la liaison couche-trou.

Dans les conditions d'opération actuelles (débits qui varient entre 300-500 m³/j), l'injection sur le dispositif C4000 montre un comportement tout à fait normal et sans aucun indice de dégradation (pas de pression de tête en injection).

Le tableau ci-dessous récapitule les derniers tests d'injectivité réalisés sur LA102 et LA109 pour la période 2007-2012 ainsi que la mesure précédente pour chacun des puits, soit les résultats pour les années 2006, 2009, 2011.

Les résultats de la période 2007-2012 sont en adéquation avec ceux des années précédentes pour les 2 puits et ne montrent aucune évolution notable de l'injectivité sur les 2 puits.

| | Puits | LA-102 | | | LA-109 | | |
|---|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | Année Test | 2006 | 2009 | 2011 | 2006 | 2009 | 2011 |
| Zone d'injection | m/tr | 4100-4150 | | | 4811-4816 | | |
| Pression statique gisement @ 3700 m/nm | bara | 28.1 +/- 0.2 | 19.9 +/- 0.2 | 20.7 +/- 1 | 125.4 +/- 0.2 | 97.9 +/- 1 | 115.9 +/- 1 |
| Pression stabilisée en injection à la jauge | bara | 47-50 | 40-45 | 32-35 | 190-215 | 160-170 | 161-167 |
| Débit d'injection pendant les tests | M3/jour | 1920-2064 | 1968-2016 | 2196-2220 | 2550-2740 | 2112-2160 | 2112-2143 |
| Pression de fond en injection @ cote d'injection m/rt | bara | 83-87 @ 4150 m | 75-80 @ 4150 m | 61-65 @ 4150 m | 260-310 @ 4815 m | 237-250 @ 4815m | 225-232 @ 4815m |
| Indice d'injectivité | Sm ³ /j/bar | 39.0 +/- 5 | 39.6 +/- 4 | 50 +/- 5 | 17.0 +/- 3 | 16.7 +/- 4 | 18 +/- 2 |

Tableau 8: résultats des tests d'injectivité aux puits LA102 et LA109 de 2006 à 2012

La différence observée dans l'indice d'injectivité des puits, à la hausse de 2009 et 2011, rentre dans l'ordre d'incertitude attendu, notamment sur des tests d'injection de courte durée (2-3 jours) pour lesquels la stabilisation de la pression « en injection » au fond du puits n'est pas atteinte. L'incertitude est aussi liée à la difficulté d'interpréter des tests d'injection sur des puits « en aspiration » et à l'incertitude persistant sur l'évaluation des gradients fluide dans le puits et dans le réservoir.

L'injectivité étant très stable sur la période, et les débits d'injection prévus étant significativement inférieurs dans les années à venir, il est envisagé de réduire la fréquence de ces tests d'injectivité, qui sont des opérations lourdes, tout en restant dans le cadre des prescriptions réglementaires.

5.7 Confinement du réservoir et écoute sismique

Pour les détails du confinement naturel du réservoir, se référer aux sections 2.2 et au dossier de sûreté.

Pour mémoire, les conclusions du monitoring microsismique réalisés avant 2004 indiquent que les déplacements correspondants le long des failles sont centimétriques à décimétriques (une magnitude 0 correspond à un déplacement de 0.5 mm d'une fracture de dix mètres et une magnitude 2 correspond à un déplacement de 5 mm pour une fracture de 100 mètres environ).

5.7.1 Ecoute sismique (Annexe 3)

5.7.1.1 *Le suivi réalisé*

En mars 2004, une écoute sismique a été mise en place pour observer les microséismes autour des injecteurs.

Mi Juillet 2007, le fil câblé qui raccordait l'ordinateur de surface et la sonde au fond, s'est rompu.

Suite à cet incident, les écoutes se sont poursuivies après la mise en place d'un nouveau système d'acquisition par la société Magnitude.

C'est ainsi qu'à partir de mi-décembre 2007 quatre stations SQUID de 4 géophones tri-axes ont été descendues dans le puits LA405 à 4 cotes (300 m, 350m, 400m, 570m). Les sondes sont opérationnelles depuis cette date et l'ensemble de la prestation de suivi a été confiée à la société Magnitude.

Il convient de rappeler que l'antenne sismique de Lacq n'a pas été conçue comme un dispositif à but de localisation des événements mais comme un dispositif de surveillance d'intégrité, et que, de ce fait l'incertitude sur la localisation des événements est d'ordre hectométrique à kilométrique.

5.7.1.2 *Fonctionnement global du système de surveillance de 2007 à 2012*

La période de surveillance microsismique du site de Lacq de 2007 à 2012, a fonctionné de manière très satisfaisante avec un taux de fonctionnement moyen de 99.2% (taux calculé pendant la période où le site de Lacq a bénéficié d'outils d'écoute microsismique).

Il est à noter que, malgré un changement d'outil et de système d'acquisition en 2007, la sensibilité théorique de détection et la sensibilité effective de localisation ont très peu évoluées de 2007 à 2012.

En effet, une seule composante (Axe Z) du capteur à -570 mètres, est en détection avec un niveau de bruit de fond constant. Du 16/12/2011 au 25/01/2012, cette voie s'est mise en défaut temporaire induisant des détections continues. Elle a été remplacée en détection pendant cette période par la voie X du capteur posé à 400m, induisant une légère diminution de sensibilité de 3 dB.

5.7.1.3 *Principaux résultats*

Le bilan et l'analyse des résultats pour la période 2007- 2012 sont fournis de façon plus exhaustive dans le document Magnitude MAG/13/0566 dont sont extraites les Figure 12 à Figure 15 ci-après.

Le système de surveillance a permis la détection de 1329 événements internes au site de Lacq, dont 695 événements ont été localisés ; les événements localisés se situent en grande majorité (72.0 %) entre 3000 et 5000 mètres de profondeur dans le réservoir de Lacq (Figure 14), avec des magnitudes faibles (principalement entre -1.0 et +1.2 ; l'événement de plus forte magnitude _ 3.6_, survenu le 01/03/2008, se situant à plus de 7000 m de profondeur).

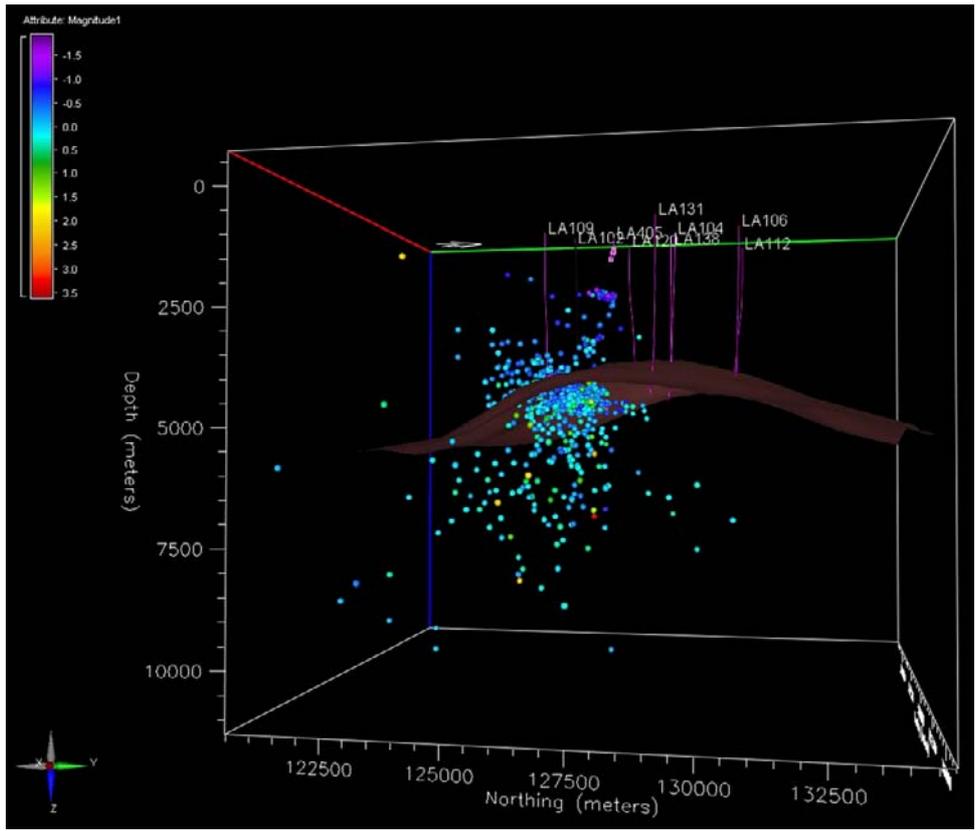


Figure 12: Localisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 (couleur en fonction de la magnitude)

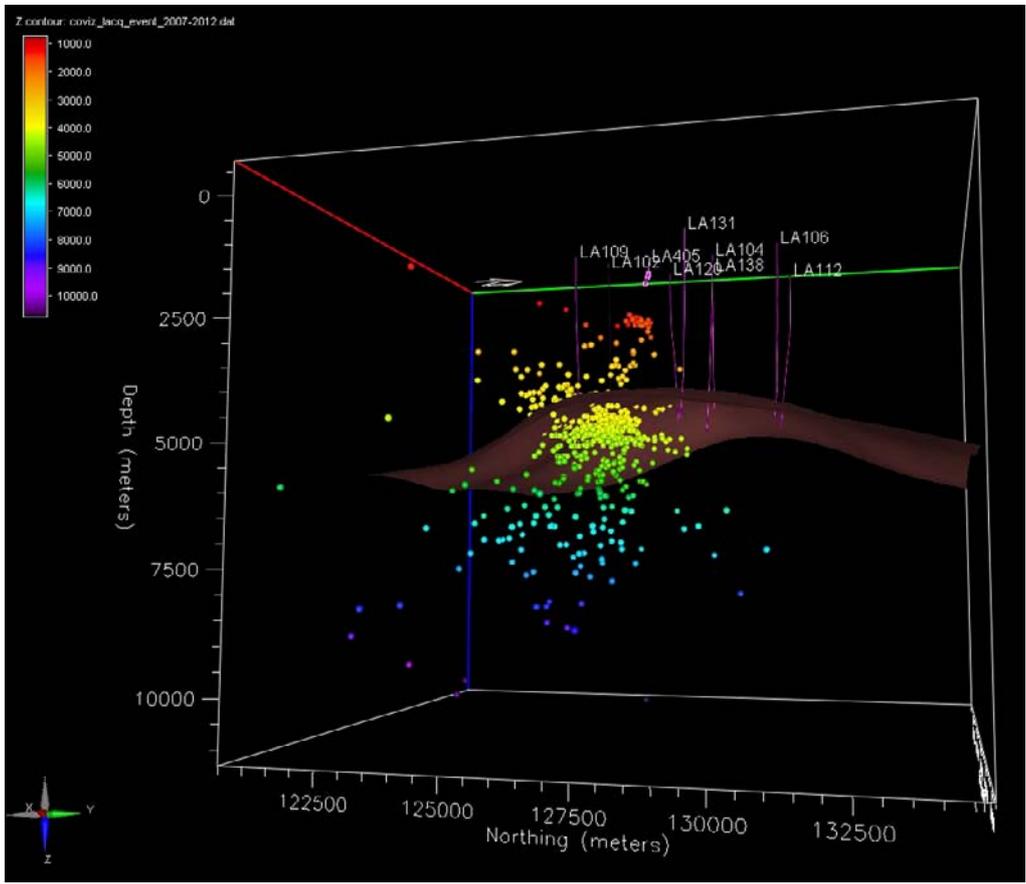


Figure 13: Visualisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 (couleur en fonction de la profondeur)

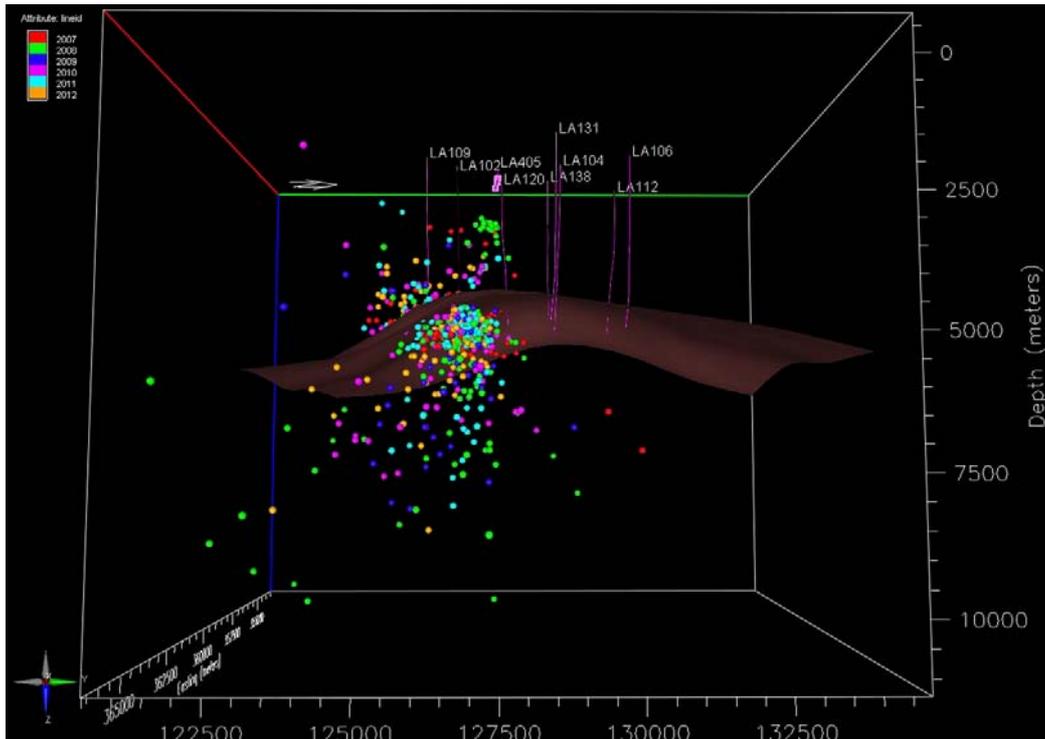


Figure 14: Visualisation 3D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 (couleur en fonction de l'année)

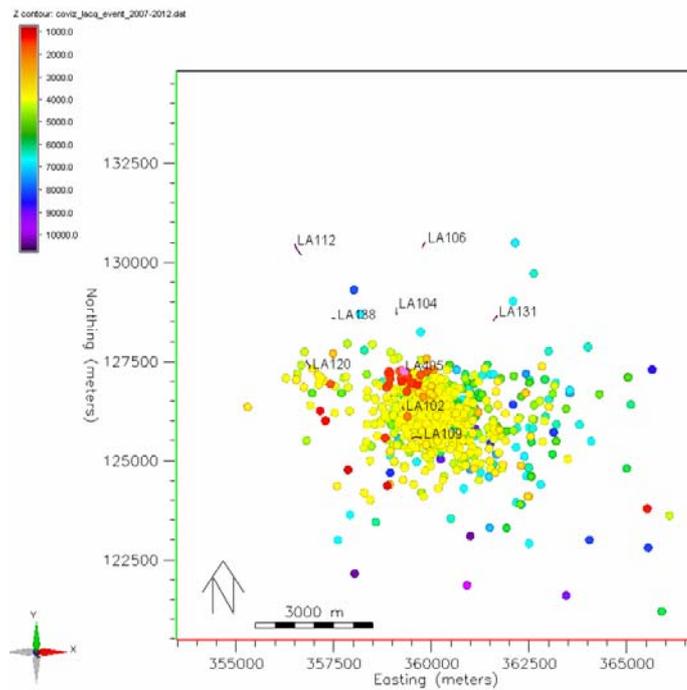


Figure 15: Localisation 2D des événements micro-sismiques internes au site de Lacq de 2007 à 2012 (vue de dessus – couleur selon la profondeur)

5.7.2 Observations sur le réservoir de Lacq Supérieur et récif sous-jacent

5.7.2.1 Contexte

Le réservoir à huile de Lacq Supérieur, situé -500m/nm de profondeur, est connecté dynamiquement à l'aquifère du récif Albo-Aptien. Ce système dynamique réservoir à huile et Récif Albo-Aptien est totalement déconnecté du réservoir à gaz de Lacq Profond par les épaisses couches argileuses des Argiles du Latérolog et des Marnes de Sainte –Suzanne.

Les eaux des gisements de Pécorade, Meillon Saint-Faust et Lacq Supérieur sont réinjectées dans le récif Albo-Aptien par deux puits LA20 et LA202.

La prévision réalisée en 2009 montrait que, avec les hypothèses alors en vigueur, la pression du Sénonien allait atteindre la valeur limite (66 bar) avant la fin de l'exploitation des champs (fin-2013). La demande d'augmentation de la pression maximale de 66 bar à 71 bar à -525 m/nm déposée par TEPF a été accordée par l'arrêté préfectoral 10/MIN/49 du 18 Octobre 2010 (autres A.P. : 05-IC-85 et 99/IC/370).

Conformément à cet arrêté, la pression de fond est mesurée au moins tous les 6 mois sur le puits LA96 et tous les ans sur LA20 ou LA202.

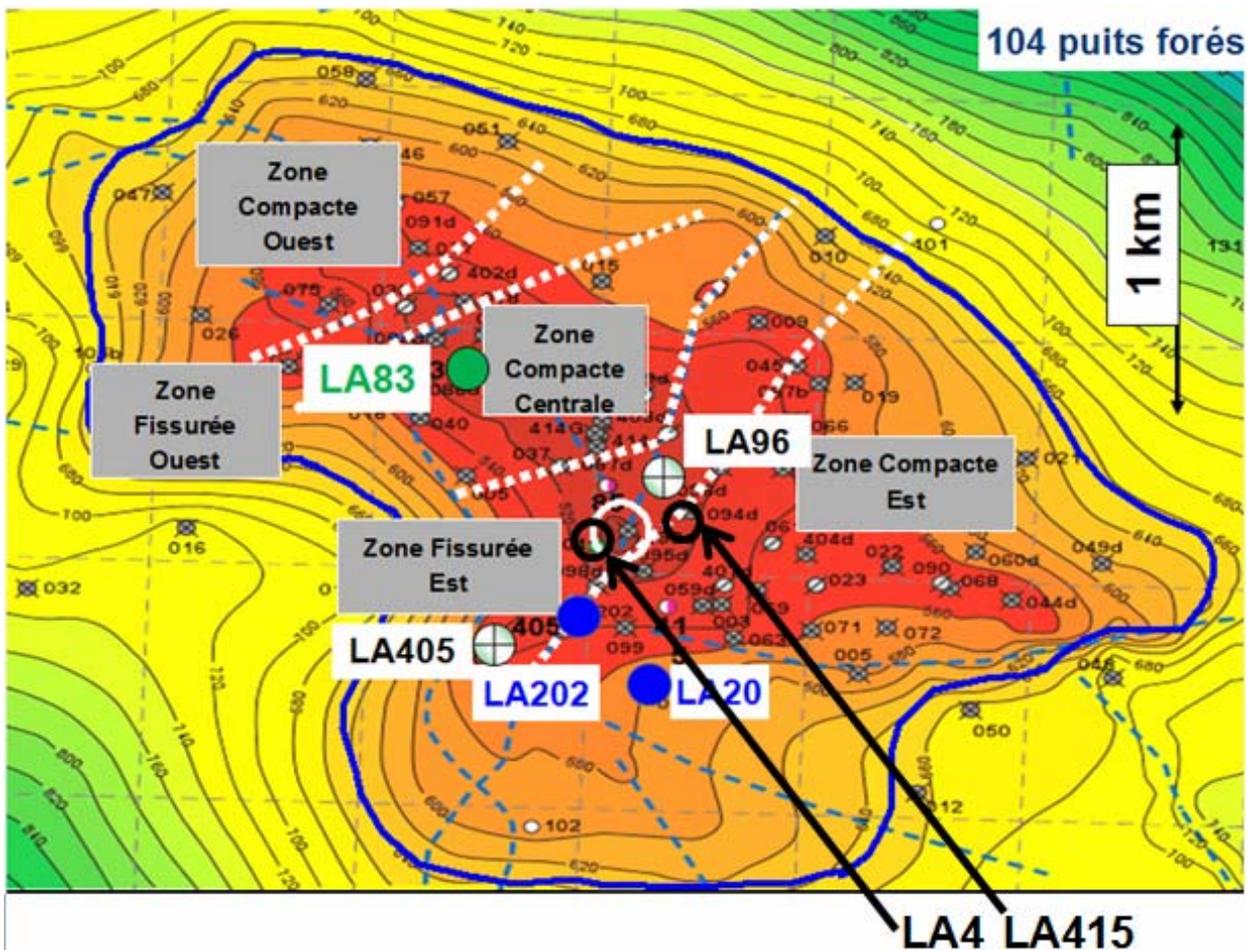


Figure 16: carte des isobathes au Toit du réservoir Sénonien inférieur et localisation des puits

5.7.2.2 Monitoring-mesures de pression

Le puits LA96 fonctionne comme puits observateur depuis janvier 2004 (en remplacement du puits LA4) par des mesures ponctuelles de pression (GPPS) et par un suivi permanent avec des jauges de fond à mémoire. L'objectif est de mesurer l'évolution de la pression en continu.

Les jauges permanentes sont descendues plusieurs fois par an. La capacité de ces jauges permettant en théorie d'enregistrer pendant 4 mois. Des problèmes de perte de données survenus de novembre 2007 à mi-février 2008 puis de mai à novembre 2011, ont conduit à remplacer les jauges tous les 2 mois.

Le suivi de la pression avec les jauges permanentes sur le puits LA96 (et de LA415 entre Juillet et Novembre 2010) est reporté sur la Figure 17 (historique depuis 2005), avec les incertitudes inhérentes aux jauges elles-mêmes et au gradient de salinité (mal connu) dans le réservoir :

- la valeur la plus probable de pression continue à la cote de référence est représentée par la courbe rouge (correction depuis la cote de mesure à environ -421 mV/NM jusqu'à la cote de référence à -525 mV/NM avec la densité médiane),
- les courbes de pression maximale et de pression minimale étant respectivement représentées en orange et en vert (correction avec des densités différentes : ρ_w max de 1.015 g/cc et ρ_w min de 0.97 g/cc).

A la descente ou à la remontée des jauges, une acquisition de type GPPS peut également être réalisée afin de vérifier le gradient de pression, i.e. la densité de l'eau du puits. La figure montre que les mesures GPPS effectuées sur LA96 de 2007 à 2013 sont en accord avec les mesures continues enregistrées au même puits.

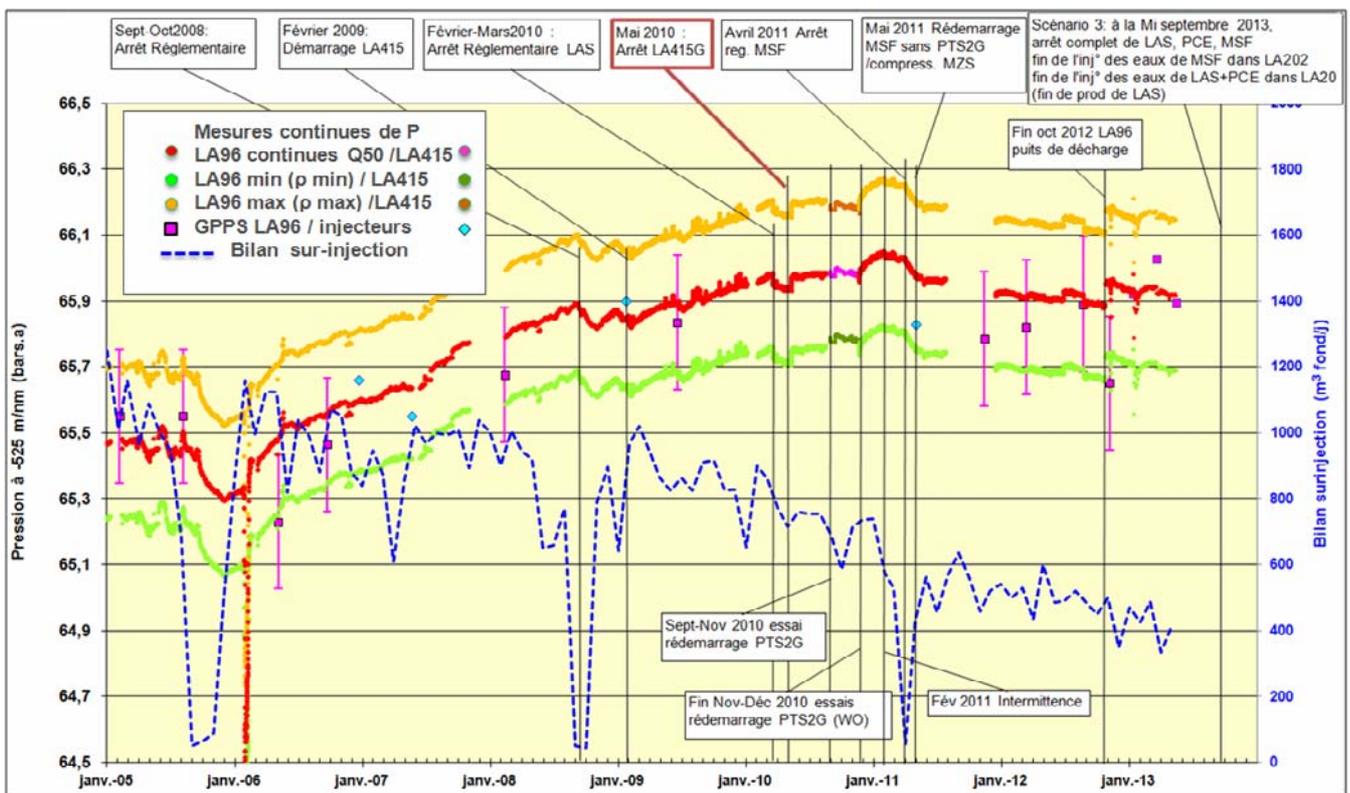


Figure 17: Lacq Supérieur – Suivi de la pression sur l'observateur LA96 : 2005-actuel

De 2007 à 2009, le « bilan de sur-injection » (bilan = volumes injectés – volumes produits, Figure 17, courbe bleue) est relativement stable et élevé (autour de 900 m³ fond/j), ce qui se traduit au niveau des pressions par une hausse continue des valeurs mesurées. Suit une période de baisse du bilan de sur-injection de 2009 à début 2011 (jusqu'à environ 650 m³ fond/j) pendant laquelle la pression continue d'augmenter, mais plus lentement. A partir de 2011, le bilan de sur-injection se stabilise en moyenne autour de 500 m³ fond/j, ce qui se traduit par une tendance à la stabilisation autour de 66 bara.

Les grandes évolutions du bilan de sur-injection expliquent donc les grandes tendances de variation de pression. Les divers événements cités en Figure 17 contribuent à expliquer les variations plus locales.

Le Tableau 9 récapitule les mesures effectuées sur la période quinquennale avec l'incertitude de mesure associée.

| Puits | Date | Valeur (bara) à -525 mV/NM | Incertitude |
|-------|----------|----------------------------|-------------|
| LA96 | 12/02/08 | 65.7 | +/- 0.2 |
| LA96 | 19/06/09 | 65.8 | +/- 0.2 |
| LA96 | 14/11/11 | 65.8 | +/- 0.2 |
| LA96 | 12/03/12 | 65.8 | +/- 0.2 |
| LA96 | 22/08/12 | 65.9 | +/- 0.2 |
| LA96 | 06/11/12 | 65.7 | +/- 0.2 |
| LA20 | 23/01/09 | 65.9 | +/- 0.2 |
| LA20 | 15/11/10 | Non stabilisée | |
| LA20 | 21/01/13 | 66.3 | +/- 0.2 |
| LA202 | 23/05/07 | 65.6 | +/- 0.2 |
| LA202 | 03/05/11 | 65.8 | +/- 0.2 |

Tableau 9: Mesures de pression sur le réservoir Sénonien inférieur de Lacq supérieur et le récif Albo-aptien (mesures continues et GPPS ramenées à la cote de -525 mV/NM)

5.7.2.3 Modèle par bilan matière

Jusqu'en 2007, un bilan matière trois mailles était utilisé pour faire le lien entre le bilan soutirage / injection et l'évolution des pressions. Ce modèle sommaire représente le réservoir de Lacq Supérieur, le "cœur" du récif, tous deux de bonnes caractéristiques et le "pied" du récif de moins bonnes caractéristiques. Ces 3 réservoirs sont en communication dynamique et constituent un ensemble isolé de l'ordre de 12.2 GSm³, valeur en accord avec les précédentes études sur le récif de Lacq.

Depuis 2007, ce modèle a été remplacé par un modèle de type « Bilan matière », présenté de façon détaillée dans le rapport de « Demande d'augmentation de la pression limite du Réservoir Sénonien de Lacq supérieur et Récif Albo/Aptien » (Réf. TEPF/DT/GSR 10-043 de juin 2010).

Ce modèle considère cinq « tanks » (Figure 18):

- trois tanks à huile et eau sur le réservoir Sénonien inférieur, tanks correspondant à des zones de caractéristiques différentes d'un point de vue pétro-physique (Tanks ZC, ZFES, ZFO pour Zone Compacte, Zone Fissurée Est et Sud, Zone Fissurée Ouest),
- un tank aquifère Turonien-Cénomaniens de Lacq supérieur (Tank AqLsup),
- un tank aquifère du Récif Albo-aptien (Tank Récif),

Les volumes retenus permettant le calage sont compatibles avec la connaissance géologique de la zone

- Accumulation d'huile du réservoir Sénonien estimée à 14 MSm³,
- Volume de l'aquifère de Lacq Supérieur : 3 GSm³,
- Volume de l'aquifère récifal : 12 Gsm³,
- la géologie, les données de pression et certains événements ayant montré que ces aquifères forment une unité hydrogéologique en communication (cf rapport cité ci-dessous), ce que traduit le modèle via des paramètres de transmissivité (losanges en bleu ciel).

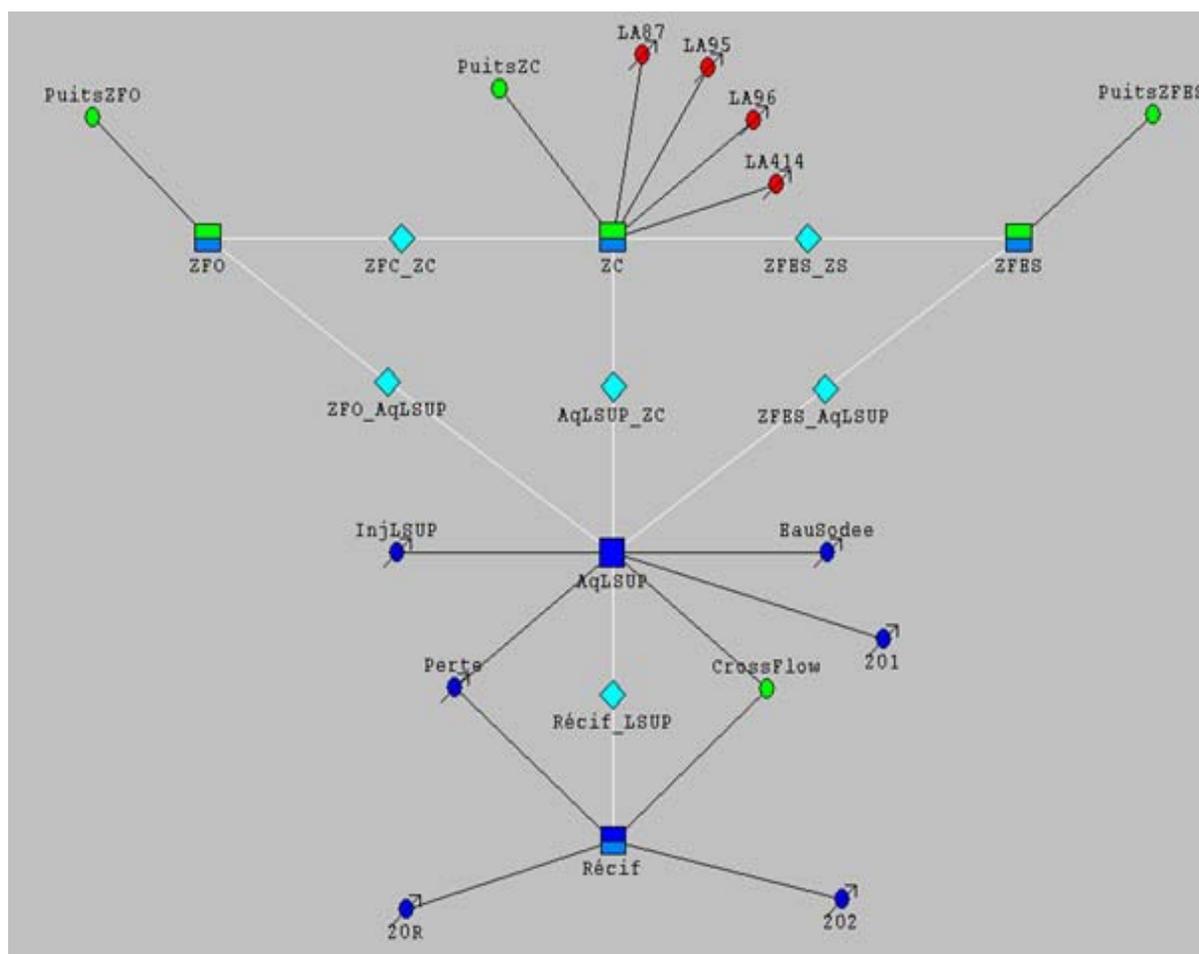


Figure 18: Modèle multi-tank de Lacq Supérieur par Bilan

En 2007, le calage de l'historique (Figure 19) a été jugé globalement satisfaisant pour ce modèle simple, même si certaines périodes restent moins bien modélisées, notamment celle de l'injection de vapeur de 1977 à 1992, avec effet étendu jusqu'en 1995 (prise en compte d'un gaz unique dans MBAL, pas de modélisation de la condensation de la vapeur d'eau ni de l'effet sur l'amélioration de la récupération d'huile).

Avec le complément d'historique, ce modèle « MBAL » montre d'autres imperfections:

- une trop grande sensibilité à la fermeture/ouverture des puits (impact sur la pression simulée lors de l'arrêt définitif du LA415 en mai 2010), qui n'est pas cohérente avec l'homogénéité de comportement « Sénonien + récif » montrée par les dernières mesures de pression (Figure 19). En 2012, des sensibilités ont été tentées sans réelle amélioration du calage.
- Par ailleurs, les mesures de pression du réservoir de Lacq Supérieur présentent une tendance à la stabilisation que le modèle MBAL ne reproduit pas. Cette tendance se produit dès la réduction de la sur-injection et paraît être liée à un effet transitoire : connexion à un aquifère moins perméable (pied du récif, périphérie du Sénonien,...).

En conclusion, le modèle présente une sensibilité trop forte aux évènements ponctuels, qui retarde la mise en évidence des évolutions de pression plus lentes notamment les effets transitoires dans le réservoir. Des ajustements du modèle sont prévus en 2013 pour atténuer cette forte sensibilité et mieux identifier les effets transitoires.

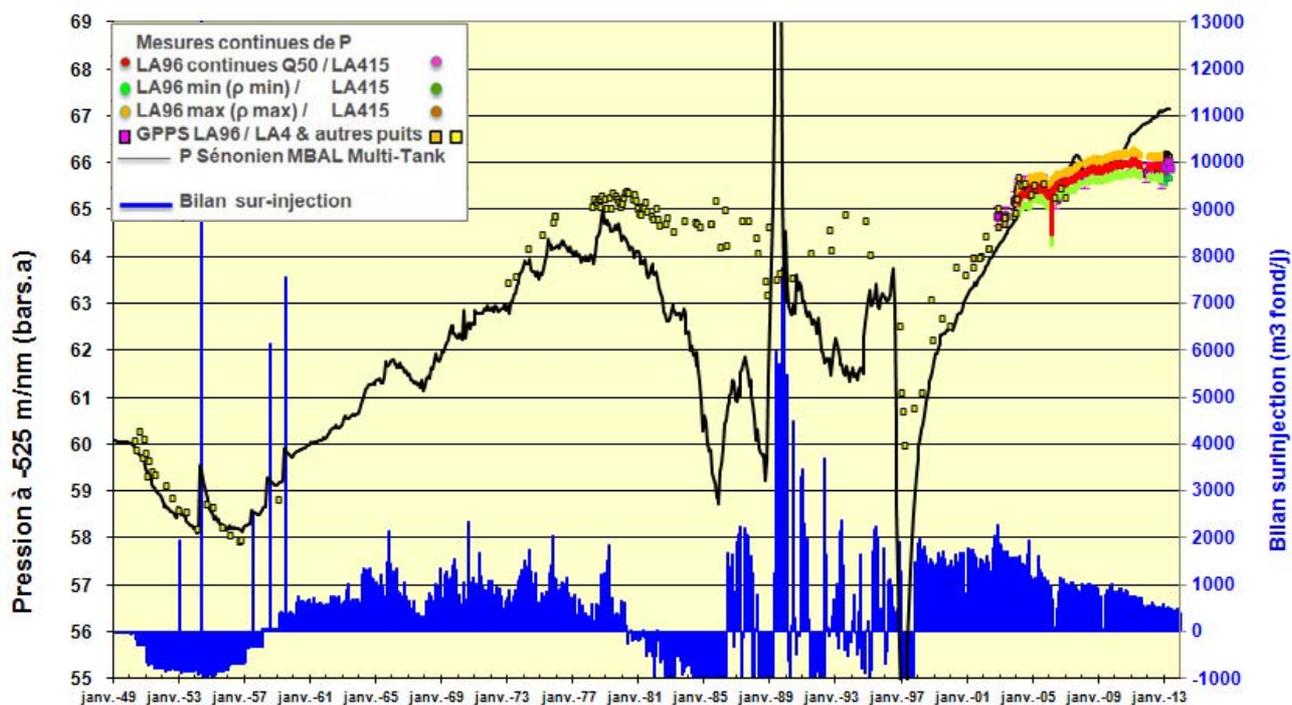


Figure 19: Calage des pressions du Réservoir de Lacq Supérieur et du Récif à la cote -525 mV/NM : mesures et Modèle MBAL multi-tank

6 Conclusions

Pendant la période 2007-2012, TEPF a veillé à respecter les arrêtés préfectoraux encadrant les conditions de fonctionnement et de suivi de l'exploitation du dispositif d'injection des eaux dans le C4000.

Les dispositions prises pour garantir le respect de la réglementation

Le suivi quantitatif et qualitatif des effluents

Il a été assuré pendant toute la période grâce à :

- Au respect des procédures de contrôle analytique,
- Au suivi de la composition des flux par rapport aux valeurs guides destinées à alerter les divers exploitants autorisés d'éventuelles dérives dans la qualité de leurs effluents,
- Un calage de l'autocontrôle par des prélèvements et des analyses simultanés effectués chaque semestre par le laboratoire de TEPF et des laboratoires agréés indépendants.

Les travaux et mesures d'amélioration du dispositif C4000

Suite à des perturbations de l'exploitation du dispositif dues à des colmatages intempestifs des filtres amonts, un suivi permanent de l'entretien des filtres a été effectuée pour garantir la préservation de la matrice.

Des travaux de protection, d'entretien et de réparation des canalisations constituant le dispositif de surface ont été réalisés pendant la période 2007-20012 :

- Audit et suivi du dispositif de protection cathodique,
- Diagnostics périodiques de corrosion sur les différents organes des têtes de puits et du réseau,
- Travaux de réfection et de remplacement des tronçons de canalisation défailants.

| Synthèse du suivi des effluents | |
|--|--|
| <i>Volumes</i> | Les volumes autorisés ont été globalement respectés, les volumes injectés étant en forte baisse sur la période. |
| <i>Qualité</i> | <p>Les résultats du suivi qualitatif des effluents montrent que les paramètres analysés ont été globalement maîtrisés. Au niveau des tendances, on notera :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Une baisse tendancielle du pH due en partie à un défaut de neutralisation chez ARKEMA et à la diminution du flux d'eaux sodées. ▪ Des pics d'hydrocarbures décelés suite à des incidents survenus sur certaines unités et à des difficultés d'échantillonnage. <p>On notera toutefois que des dépassements ponctuels des valeurs guides ont été constatés sur certains paramètres. L'analyse de ces dépassements montre qu'ils reflètent le plus souvent des incidents ponctuels et non une dérive structurelle du fonctionnement des unités.</p> |

| Aspects gisement | |
|--|---|
| <i>La connaissance du comportement du gisement et des performances du dispositif d'injection</i> | <p>Les ingénieurs de TEPF ont réalisé un monitoring attentif du comportement du gisement grâce à :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Un suivi de l'évolution de la pression dans les puits du gisement et à sa comparaison avec des modèles d'écoulement, ▪ A la réalisation d'essais d'injectivité dans les puits injecteurs, ▪ Un suivi de la composition du gaz produit, ▪ Au dispositif 3D de localisation et de caractérisation des événements micro-sismiques dans les couches productrices du gisement. ▪ Ils ont également mené des études spécifiques sur les interactions fluides-matrice |
| <i>Injectivité et comportement du réservoir</i> | <p>Les mesures d'injectivité réalisées sur les puits injecteurs LA 102 et LA 109 montrent des valeurs stables sur la période.</p> <p>Ces mesures, confirment la compréhension acquise sur le comportement particulier du gisement qui se caractérise par des zones fracturées très productives qui permettent de drainer latéralement et verticalement dans le réservoir la matrice poreuse et peu perméable.</p> <p>Les études et modélisations géochimiques des phénomènes d'interactions fluides injectés / matrice minérale du réservoir, ont été approfondies en intégrant la dimension spatiale et les effets thermiques. Elles tendent à démontrer que l'injection des fluides dans le C4000 favoriserait au cours du temps une faible augmentation de la porosité du réservoir, limitée au voisinage des puits.</p> |

Confinement du réservoir C4000

La prise en compte des aspects confinement du réservoir a fait l'objet des mesures suivantes :

- Le monitoring des événements microsismiques a été entièrement reconçu et son suivi confié à la société spécialisée Magnitude. Les résultats obtenus confirment que les événements enregistrés sont le reflet de déplacements infra-centimétriques le long de failles pré-existantes.
- On notera également que ces observations sont corroborées par le régime de pression du gisement qui ne montre aucune perturbation et un comportement conforme aux précisions des modèles depuis les nombreuses années de son exploitation.

Les volumes cumulés des effluents injectés dans le C4000 sont actuellement de 7.8 millions de m³, ce qui représente moins de 1% du volume poreux du gisement.

Le système Lacq Profond est déconnecté des autres systèmes voisins, les effluents injectés restent confinés au sein de ce réservoir et migrent par gravité vers le scellement de la structure (Figure 20).

Crétacé 4000 : Schéma des injections au 01/01/2007

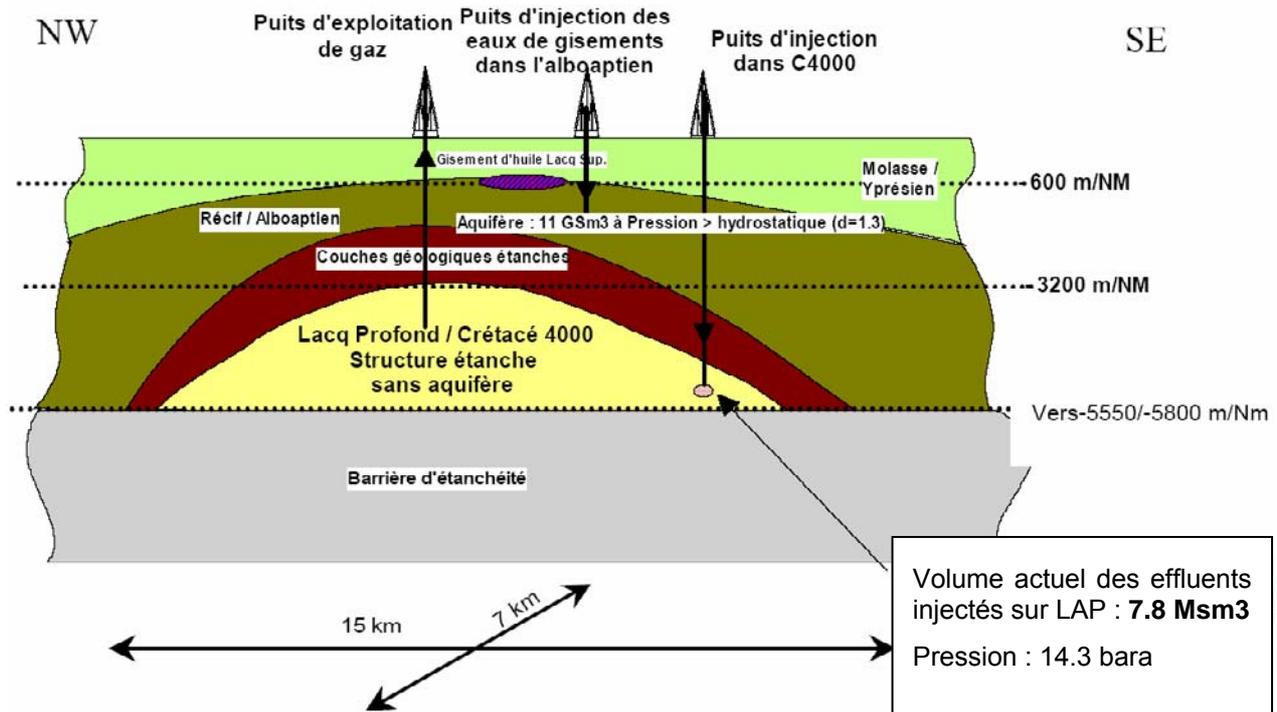


Figure 20: Schéma de l'état actuel des injections

*Compréhension des phénomènes
et modélisations*

L'ensemble des acquisitions et du monitoring réalisés sur le réservoir de Lacq Profond et sur le réservoir de Lacq Supérieur et récif ainsi que les modélisations associées à ces champs permettent de confirmer que les phénomènes décrits dans le dossier de sûreté sont bien maîtrisés et correspondent aux prédictions (en tenant compte des imperfections de la modélisation par bilan matière).

Les études et acquisitions récentes (ECLIPSE, injectivité des puits ...) ont permis de confirmer la vision plus fine de ces injections dans le C4000 qui avait été initiée lors de la dernière période quinquennale, vision établie grâce à l'acquisition d'informations nouvelles (caméra par exemples) et un processus d'intégration des phénomènes observés dans les modèles.

Elles montrent ainsi :

- un réservoir avec une fracturation de bonne extension latérale, sans aquifère,
- des puits avec de bons index d'injectivité,
- un confinement assuré par des barrières d'étanchéité à la base et au sommet du réservoir de Lacq Profond, sans lien possible avec des aquifères sus ou sous-jacents.

7 Perspectives

Evolution des flux en 2014

Contexte

En octobre 2013, TEPF arrêtera sa production de gaz commercial, et ses installations de traitement de gaz entreront dans un processus de démantèlement.

Un nouveau schéma industriel dit « LCC30 » (Lacq Cluster Chimie 2030) entrera en activité. Il est constitué : (i) d'une production de gaz brut à faible débit (environ 300 km³/j) par TEPF ou son successeur, (ii) du traitement de ce gaz brut par SOBEGI dans une Unité de Traitement de Gaz (UTG) construite à cet effet en 2012-2013 par SOBEGI ; (iii) l'alimentation des unités d'Arkema en H₂S pur.

Dans ce schéma, la production de gaz brut est pilotée par le besoin d'H₂S d'Arkema, l'intégralité de l'H₂S étant consommé par Arkema, et le méthane associé étant utilisé par SOBEGI pour alimenter ses chaudières à vapeur.

Impact sur les flux d'eaux injectées au C4000

Le flux des eaux de condensation issues du réservoir va évoluer dans des proportions très significatives. En raison de la forte baisse des quantités de gaz brut produit, les quantités d'eaux de condensations seront également en forte baisse. Il est estimé que leur quantité annuelle d'environ 100 000 m³ en 2012 sera d'environ 20 000 à 40 000 m³ à partir de 2014 (en fonction de la quantité de gaz brut réellement produit, et du comportement de l'eau condensée dans les puits produisant à des débits plus faibles).

Le flux d'eaux industrielles de la plate-forme de Lacq sera réduit d'environ 50 % dans la mesure où sur 20 000 m³/an 10 000 m³ sont en 2012 liés à la fabrication de gaz commercial par TEPF, activité qui n'existera plus en 2014. En ce qui concerne les autres 10 000 m³/an, générés en 2012 par Arkema, une partie (environ 3000 m³/an) sera générée dans l'UTG de SOBEGI en raison de la mise en place du schéma LCC30, Arkema ne générant plus que 7000 m³/an.

L'activité industrielle de la plate-forme de Mourenx n'est pas impactée par les importants changements intervenant fin 2013 sur la plateforme de Lacq. En conséquence, Les flux d'eaux industrielles issus de la plateforme SOBEGI Mourenx seront identiques (en ordre de grandeur) en 2014 à ce qu'ils étaient en 2012, à savoir légèrement inférieurs à 50 000 m³/an.

Étude des solutions alternatives à l'injection au C4000

Une étude des solutions alternatives à l'injection des effluents au C4000 a été menée de mi 2010 à fin 2012.

Elle a conclu à une traitabilité des effluents par la STEB limitée. La recherche de valorisation des effluents salins par des procédés complémentaires n'a pas permis d'identifier de filière qui ne soit pas très pénalisante du point de vue technico-économique.

Pour ces motifs il apparaît que la majorité en volume des flux doivent continuer à être injectés. Cependant, certains industriels se sont engagés à mettre en place des programmes de réduction, voire de suppression des injections.



L'administration a indiqué qu'il sera tenu compte de ces évolutions et qu'un arrêté modificatif sera pris à cet effet.

ANNEXE 1

RAPPORT DE CALAGE DES AUTOCONTROLES

| | |
|--------------------------|--|
| Destinataire / To | G. LE MOAL |
| Copie / Copy | A. COMMARIEU - L. PRAT – P. FOURMENTRAUX |
| Expéditeur / From | |
| Nom / Name | Jean Claude MIQUEU |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | JCM/GL N° 09.071 |
| Date | 16 avril 2009 |
| Objet / Subject | Comité Local de Suivi (CLS) des injections C 4000. |

Suite à la dernière réunion, le 26 novembre 2008, du Comité Local de Suivi des injections C 4000, le Comité a souhaité :

- un bilan des résultats d'analyses dans le cadre des autocontrôles réalisées entre le Laboratoire extérieur agréé (Laboratoire des Pyrénées -Lagor) et le Laboratoire Contrôle Environnement (TOTAL TEPF)
- une analyse des alertes survenues dans l'année

1/ bilan des résultats des autocontrôles.

Dans l'arrêté préfectoral fixant les prescriptions relatives aux injections dans le Crétacé 4000, il est demandé un calage de l'auto surveillance (article 12). Deux fois par an, les prélèvements, mesures et analyses doivent être réalisées par un Laboratoire extérieur agréé ; les résultats sont transmis à l'inspection des installations classées. Ces autocontrôles ont été mis en place au second semestre 2006 et sont réalisés sur les puits injecteurs LA 102 ou LA 109 conjointement avec le Laboratoire des Pyrénées à Lagor.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir :

pH, Eh, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Dans le tableau en annexe 1, sont regroupés les résultats des 2 laboratoires. Les écarts observés proviennent :

- la non stabilisation de l'échantillon avant analyse : cas des analyses de phénols en septembre 2008 ; le laboratoire de Lacq ne stabilisait pas au préalable les échantillons d'où une évolution possible ; depuis les derniers prélèvements en 2008, nos échantillons sont stabilisés avec du sulfate de cuivre
- des différences de techniques d'analyses utilisées par les laboratoires : analyses des sulfates par néphélométrie (mesure du trouble par absorbance) à Lagor et par chromatographie ionique à Lacq : en décembre 2006 ; par la suite le Laboratoire de Lagor a utilisé la chromatographie ionique, technique moins sujette aux interférences et les écarts dans les résultats sont depuis acceptables



TOTAL

- des différences dans le mode opératoire avant analyse : cas des hydrocarbures où la prise d'essai pratiquée à Lacq, plus faible (90 cm³), pouvait entraîner des pertes d'hydrocarbures par adsorption sur les parois du flacon ; nous avons depuis harmonisé notre mode opératoire sur celui de Lagor en travaillant sur la totalité du volume du flacon (900 cm³).
- difficulté de prélever un échantillon homogène et représentatif : en raison de contraintes environnementales et d'hygiène industrielle, entraînant des purges minimum avant de prélever. Cette difficulté peut se traduire par des différences, plus particulièrement, sur les paramètres comme les matières en suspension, le pH et les hydrocarbures. Pour ce dernier paramètre, le fait d'avoir parfois des échantillons bi phasiques rend les analyses d'autant plus délicates.

La prise d'échantillon homogène est le plus délicat aussi nous avons modifié lors de notre dernier prélèvement, notre façon d'opérer : l'échantillon est prélevé dans un bidon de 10 litres avant d'être fractionné au laboratoire dans des conditions d'hygiène plus optimales entre les 2 laboratoires.

2/ Bilan des alertes

La mise en place de valeurs guides en septembre 2008, a permis le déclenchement d'alertes en cas de dépassement de seuils et d'informer rapidement les Exploitants afin de pouvoir apporter des actions correctives.

Dans le tableau en annexe 2, le détail des observations et actions est repris depuis la mise en place effective de ces seuils d'alerte.

Dans l'annexe 3, un bilan des valeurs moyennes observées sur des paramètres ayant un impact sur la matrice (chlorures – MES - pH – salinité) ou sanitaire (H₂S – hydrocarbures).

Jean Claude MIQUEU

Annexe 1

**Bilan des Auto-contrôles dans le cadre du suivi des injections dans C 4000
années : 2006 - 2008**

| Déterminations | unité | méthodes | LCE | LDP | LCE | LDP | LCE | LDP | LCE | LDP | LCE | LDP | LCE | LDP |
|---------------------------|-------|------------------|------------|--------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|------------|-----------------|-----------------|----------------|------------|
| | | | 07/12/2006 | | 02/08/2007 | | 13/12/2007 | | 11/09/2008 | | 03/12/2008 | | 12/03/2009 | |
| pH | | NFT 90-008 | 8,50 | 8,60 | 8,20 | 7,40 | 11,00 | 9,10 | 10,80 | 11,90 | 7,00 | 7,00 | 8,90 | 9,50 |
| MES | mg/l | EN 872 | 128 | 51 | 4,5 | < 2 | 164 | 31 | 24 | 138 | 130 | 37 | 160 | 76 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 240 | 211 | 7,6 | 25,1 | 2000 | 20 | 5,1 | 221 | 18 g/l * | 428 | 540 | 226 |
| chlorures | g/l | NF EN ISO 10304 | 19,1 | 19,9 | 0,009 | < 0,025 | 0,006 | 0,008 | 0,013 | 0,022 | 1,78 | 1,69 | 21,9 | 22,6 |
| sulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 700 | 379 | 24 | 45 | 56 | 37 | 20 | 26 | 200 | 174 | 655 | 421 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 1271 | 980 | 211 | 206 | 848 | < 5 | 332 | 161 | 691 | 225 | 1501 | 3400 |
| nitrites | mg/l | NF EN ISO 10304 | 10 | 4,6 | 3,4 | 15 | 3,7 | < 10 | < 0,5 | 15 | < 0,5 | < 50 | < 0,5 | < 10 |
| phosphates | mg/l | NF T 90-023 | < 0,5 | < 0,1 | < 0,5 | 1680 | < 0,5 | < 0,1 | < 0,5 | < 1 | < 0,5 | 0,9 | < 0,5 | < 6 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | < 0,5 | 0,9 | < 0,5 | < 25 | < 0,5 | 7 | < 0,5 | < 0,2 | < 0,5 | 2,2 | < 0,5 | < 4 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | < 10 | < 10 | < 10 | < 5 | < 10 | < 10 | < 10 | < 5 | < 10 | < 50 | < 10 | < 10 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | 32 | 18250 | < 10 | 24 | < 10 | 33 | < 10 | 96 | 260 | < 50 | < 10 | 186 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | < 10 | < 10 | < 10 | < 5 | < 10 | < 10 | < 10 | < 5 | < 10 | < 50 | < 10 | < 10 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | 0,55 | 0,03 | 0,42 | 1,56 | 0,20 | 0,20 | < 0,2 | 7,2 | < 0,2 | 0,22 | 0,26 | 0,77 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 5300 | 6700 | 869 | 1200 | 879 | 532 | 725 | 1100 | 1040 | 1760 | 4789 | 4340 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 13,6 | 21,8 | 5,9 | 10,3 | 3,8 | 5,3 | 4,5 | 5,2 | 1,8 | 8,8 | 8,8 | 9,6 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 0,6 | 2 | 0,33 | 0,39 | 0,83 | 3,1 | < 0,3 | < 1 | < 0,3 | < 1 | < 0,3 | < 1 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 99 | 157 | < 0,55 | 0,73 | 0,68 | 0,66 | 1,1 | 0,7 | 4,2 | 4,1 | 57,4 | 79,2 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | < 0,2 | 0,09 | < 0,2 | 0,16 | < 0,2 | 0,08 | < 0,2 | 0,13 | < 0,2 | 0,10 | < 0,2 | 0,12 |
| cyanures | µg/l | NF EN ISO 14403 | 55 | 55 | < 250 | < 250 | 140 | < 125 | < 250 | < 250 | < 100 | < 100 | < 100 | < 100 |
| phenols | µg/l | NF EN ISO 14402 | 263 | 91 | < 10 | < 10 | 60 | 164 | < 100 | 266 | 506 | < 100 | < 100 | < 100 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -480 | -590 | -427 | -570 | -510 | -304 | -448 | -451 | -357 | -388 | -435 | -566 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 0,06 | non mesuré | 0,48 | < 0,5 | 0,45 | 0,28 | 1,2 | 0,15 | 1,7 | 3,6 | 0,6 | 0,2 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 89122 | 103800 | 5130 | 5000 | 5487 | 6064 | 6611 | 6224 | 7938 | 7983 | 90665 | 100483 |

* : méthode visuelle

Annexe 2

Bilan des alertes sur dépassement de valeurs guides

| date | paramètres | valeurs observées | valeur guide | causes | actions correctives |
|------------|------------------------|-------------------|---------------|---|--|
| 18/09/2008 | salinité | 431 340 µS/cm | 200 000 µS/cm | eaux de gisements de PCE et Lacq Sup disposées vers C 4000 en raison d'intervention sur puits LA 20 | marche dégradée installations |
| | matières en suspension | 1012 mg/l | 600 mg/l | | |
| | hydrocarbures | 5,7% | 5% | | |
| 25/09/2008 | hydrocarbures | 14% | 5% | idem | idem |
| 19/11/2008 | hydrocarbures | 7,3% | 5% | niveau interface ballon 60 m3 trop bas | rappel consigne d'exploitation niveau à 60% |
| 31/03/2009 | matières en suspension | 650 mg/l | 600 mg/l | niveau interface ballon 60 m3 trop bas | rappel consigne d'exploitation niveau à 60% |
| | hydrocarbures | 7,30% | 5% | | |

Annexe 3

| | | | Eaux Plateforme D10861 | | | Eaux injection LA102/LA109 | | | | |
|------------------|------------------------------|--------|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>impacts</i> | Détermination | unité | Valeur guide | 2008 | 2007 | 2006 | Valeur guide | 2008 | 2007 | 2006 |
| | | | | <i>moyenne</i> | <i>moyenne</i> | <i>moyenne</i> | | <i>moyenne</i> | <i>moyenne</i> | <i>moyenne</i> |
| <i>matrice</i> | Chlorures | mg/l | 2700 | 530 | 165 | 150 | 50000 | 7190 | 14570 | 27680 |
| | Matières en suspension (MES) | mg/l | 600 | 350 | 293 | 195 | 600 | 250 | 330 | 470 |
| | pH | | > 6,5 | 10,5 | 9,9 | 11,9 | > 6,5 | 9,9 | 9,5 | 9,3 |
| | Salinité théorique à 20°C | µS/cm | 110000 | 24830 | 25800 | 69770 | 200000 | 91600 | 68000 | 172000 |
| <i>sanitaire</i> | H2S | mg/l | 4000 | 1600 | 1180 | 1300 | 4000 | 1220 | 1375 | 1130 |
| | Hydrocarbures | % Vol. | 5 | 2,9 | 1,4 | 1,5 | 5 | 1,3 | 0,9 | 0,9 |

| | |
|--------------------------|--|
| Destinataire / To | G. LE MOAL |
| Copie / Copy | A. COMMARIEU – B. PERICO – C. MOUSQUES-SOULAS – A. MOYEN - P. FOURMENTRAUX |
| Expéditeur / From | C. DEFALQUE |
| Nom / Name | |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | CD-10.023 |
| Date | 8 février 2010 |
| Objet / Subject | Auto surveillance : analyses injection C 4000. |

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C 4000", le deuxième prélèvement pour l'année 2009 a été réalisé le 25 novembre 2009.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire des Pyrénées à Lagor, Laboratoire extérieur agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir :

- pH, Eh, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Afin de minimiser la difficulté de prélever et de fractionner sur site les échantillons entre les 2 laboratoires, de s'affranchir des contraintes environnementales et de sécurité, nous avons modifié notre manière d'opérer ; l'échantillon est prélevé dans un bidon de 10 litres et est ensuite fractionné en laboratoire dans des conditions d'hygiène plus optimales avant de le fournir pour analyses aux 2 laboratoires

Le tableau en annexe regroupe les résultats des 2 laboratoires.

Comme pour les analyses réalisées sur le 1^{er} prélèvement de l'année (12 mars 2009), nous observons un écart de mesure sur les matières en suspension. Cet écart récurrent entre les 2 laboratoires s'explique par l'hétérogénéité des échantillons.

L'écart de mesures pourrait s'expliquer par la différence de technique d'analyse : LDP, colorimétrie et LCE chromatographie ionique.

Les résultats sont détaillés dans le tableau de la page suivante.

| Déterminations | unité | Méthodes | LCE | LDP |
|---------------------------------|-------|------------------|-------------------|------------|
| | | | prélevé 25 nov 09 | |
| | | | LIMS | n° dossier |
| | | | 301642 | 94892 |
| pH | - | NFT 90-008 | 9,20 | 8,95 |
| MES | mg/l | EN 872 | 350 | 99 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 3800 | 3288 |
| chlorures LCE | g/l | NF EN ISO 10304 | 13815 | |
| chlorures LDP | | Méthode interne | | 11750 |
| sulfates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | 664 | |
| sulfates LDP | | Méthode interne | | 728 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 221 | 453 |
| nitrates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | |
| nitrates LDP | | Colorimétrie | | 27,9 |
| phosphates LCE | mg/l | NF T 90-023 | 20,1 | |
| phosphates LDP | | Méthode interne | | <1 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | <0,5 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | 20100 | 24450 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | <0,2 | <0,020 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 14014 | 16700 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 3,3 | 8,5 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,904 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 8,2 | 21,9 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <0,2 | 0,05 |
| cyanures | µg/l | NF EN ISO 14403 | 142 | 172 |
| phenols Sous traité pour LCE | µg/l | NF EN ISO 14402 | <100 | 166 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -437 | -477 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 0,67 | 0,45 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 85000 | 95612 |

C. Defalque

Responsable Service Analyse Minérale

Destinataire / To

G. LE MOAL

Copie / CopyA. COMMARIEU –H GARRAUD- B. PERICO –
C. MOUSQUES-SOULAS – A. MOYEN - P.
FOURMENTRAUX

Expéditeur / From

C. DEFALQUE

Nom / Name

Service / Department

LCE

Références / References

CD-10.120

Date

10 juin 2010

Objet / Subject

Auto surveillance : analyses injection C 4000.

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 1^{er} prélèvement pour l'année 2010 a été réalisé le 14 avril dernier.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, Eh, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Nous notons une différence significative entre les résultats des 2 laboratoires pour le thiosulfate. Ceci a déjà été mis en évidence en 2007. Chaque laboratoire a confirmé ses résultats. Cet écart entre les 2 laboratoires s'explique par l'hétérogénéité des échantillons.

Le tableau en annexe regroupe les résultats des 2 laboratoires.

| Déterminations | unité | Méthodes | LCE | LDP |
|---------------------------------|-------|------------------|-----------------------|------------|
| | | | prélevé 14 avril 2010 | |
| | | | LIMS | n° dossier |
| | | | 313121 | 105435 |
| pH | - | NFT 90-008 | 11,55 | 11,80 |
| MES | mg/l | EN 872 | 93 | 64 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 455 | 879 |
| chlorures LCE | g/l | NF EN ISO 10304 | 2,4 | |
| chlorures LDP | | Méthode interne | | 21,2 |
| sulfates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | 31,2 | |
| sulfates LDP | | Méthode interne | | 121 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 1678 | 16300 |
| nitrates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | 2,7 | |
| nitrates LDP | | Colorimétrie | | 16,1 |
| phosphates LCE | mg/l | NF T 90-023 | <0,5 | |
| phosphates LDP | | Méthode interne | | <1 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | <0,5 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | 10 | <25 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | 250 | 795 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 3823 | 3500 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | <1 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | <1 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 2,44 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <0,2 | 0,02 |
| cyanures | µg/l | NF EN ISO 14403 | 152 | 130 |
| phenols Sous traité pour LCE | µg/l | NF EN ISO 14402 | 776 | 453 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -532 | -646 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 0,18 | 0,21 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 21400 | 17715 |

C. Defalque

| | |
|--------------------------|--|
| Destinataire / To | G. LE MOAL |
| Copie / Copy | H GARRAUD- B. PERICO – C. MOUSQUES-SOULAS – JM. VERGNOLLES - P. FOURMENTRAUX |
| Expéditeur / From | C. DEFALQUE |
| Nom / Name | |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | CD-10.238 |
| Date | 15 décembre 2010 |
| Objet / Subject | Auto surveillance : analyses injection C 4000. |

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 2^{ème} prélèvement pour l'année 2010 a été réalisé le 10 novembre dernier.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, potentiel redox, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Nous notons un écart de mesure entre les 2 laboratoires pour le thiosulfate. Ceci a déjà été mis en évidence sur l'échantillon prélevé en début d'année. Chaque laboratoire a confirmé ses résultats. Cet écart pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité des échantillons.

Le tableau suivant regroupe les résultats des 2 laboratoires.

| Déterminations | unité | Méthodes | LCE | LDP |
|---------------------------------|-------|------------------|-----------------|------------|
| | | | prélevé 10nov10 | |
| | | | LIMS | n° dossier |
| | | | 329614 | 126563 |
| pH | - | NFT 90-008 | 6,90 | 6,64 |
| MES | mg/l | EN 872 | 5 | <2 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 7,9 | 5,97 |
| chlorures LCE | g/l | NF EN ISO 10304 | 65,9 | 76,4 |
| sulfates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | 26,0 | 32,4 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 119,3 | 899 |
| nitrates LCE | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | 21,7 |
| phosphates LCE | mg/l | NF T 90-023 | <0,5 | |
| phosphates LDP | | Méthode interne | | 1,56 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | 0,725 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | <10 | 5,94 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,05 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 245 | 279 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | 1,8 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | <1 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | 4,97 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,0141 |
| cyanures | µg/l | méthode interne | <100 | <100 |
| phenols Sous traité pour LCE | µg/l | NF EN ISO 14402 | <900 | 8420 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -350 | -390 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 5,6 | 0,58 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 1807 | 1804 |

| | |
|--------------------------|---|
| Destinataire / To | G. LE MOAL |
| Copie / Copy | H GARRAUD - A. KARSENTY C. MOUSQUES-SOULAS – JM. VERGNOLLES - P. FOURMENTRAUX |
| Expéditeur / From | C. DEFALQUE |
| Nom / Name | |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | CD-11.042 |
| Date | 5 mai 2011 |
| Objet / Subject | Auto surveillance : analyses injection C 4000. |

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 1er prélèvement pour l'année 2011 a été réalisé le 3 mars dernier.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, potentiel redox, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

L'échantillon du LCE a été prélevé quelques minutes avant celui de LDP.

Le tableau ci-dessous récapitulant les résultats d'analyses des 2 laboratoires met en évidence des écarts de mesures entre les 2 laboratoires pour le pH, les MES, hydrocarbures, sulfates, thiosulfate et la salinité.

La différence de résultats est très importante pour le dosage des hydrocarbures, la mesure du LDP est 160 fois inférieure à celle du LCE. Les résultats du tableau ci-après sont des mesures d'hydrocarbures selon la norme NF ISO 9377-2 qui dose les HC de C10 à C40. Les 2 laboratoires ont suivi le même protocole. L'échantillon analysé au LCE était bi phasique avec 2.5% hydrocarbures totaux en volumique.

L'hétérogénéité des échantillons et les différences de dates d'analyses pourraient expliquer ces écarts :

En effet, la difficulté de pouvoir bien purger les lignes pour des raisons de sécurité et d'hygiène, ne permet pas un balayage suffisant pour fournir des échantillons homogènes aux 2 laboratoires.

De plus, les dosages des sulfates et thiosulfates ont été réalisés au laboratoire de Lagor entre 6 jours et 11 jours après ceux du LCE. L'évolution dans le temps de l'échantillon pourrait expliquer les écarts (réaction oxydo-réduction). Pour le pH et les MES, on note des analyses réalisées près de 2 mois après le prélèvement.

Bulletin du laboratoire de Lagor est en annexe 1.

| Déterminations | Méthodes | unité | LCE | LDP |
|-------------------------|---------------------|-------|------|--------|
| pH | NFT 90-008 | - | 8,6 | 12 |
| MES | EN 872 | mg/l | 81 | 25 |
| Hydrocarbures | NF ISO 9377-2 | mg/l | 3800 | 23,87 |
| chlorures | NF EN ISO 10304 | mg/l | 100 | 112 |
| sulfates | NF EN ISO 10304 | mg/l | 112 | 19,9 |
| thiosulfates | NF EN ISO 10304 | mg/l | 450 | 167 |
| nitrates LCE | NF EN ISO 10304 | mg/l | <0,5 | <5 |
| phosphates | LCE:NFT T 90-023 | mg/l | <0,5 | - |
| | LDP:Méthode interne | | - | <0,06 |
| bromures | NF EN ISO 10304 | mg/l | <0,5 | <10 |
| formiates | chromato ionique | mg/l | <10 | <25 |
| acétates | chromato ionique | mg/l | <10 | 12,5 |
| propioniates | chromato ionique | mg/l | <10 | <25 |
| fer (dissous) | NF EN ISO 11885 | mg/l | <1 | 0,175 |
| sodium | NF EN ISO 11885 | mg/l | 1203 | 1140 |
| calcium | NF EN ISO 11885 | mg/l | 3,2 | 1,2 |
| magnésium | NF EN ISO 11885 | mg/l | <2 | <0,5 |
| potassium | NF EN ISO 11885 | mg/l | <2 | 0,31 |
| strontium | NF EN ISO 11885 | mg/l | <1 | 0,0103 |
| cyanures* | méthode interne | mg/l | <10 | <10 |
| phenols* | NF EN ISO 14402 | mg/l | <10 | <10 |
| potentiel rédox | in situ | mV | -410 | -450 |
| oxygène dissous | NF EN 25813 | mg/l | 2,55 | <0,1 |
| salinité (sels dissous) | FDT 90-111 | µs/cm | 7395 | 4451 |

* : Analyses sous traitées pour LCE



RCS PAU 98 25 263 - N° SIRET 418 314 059 00014 - CODAGE P71328
Rue des écoles - 64150 LAGOR Tél: 05-59-60-23-85 Fax: 05-59-60-74-42

| |
|--|
| Echantillon : LA 102 (C-4000) |
| Lieu de prélèvement : TOTAL LA102 Lagor |
| Nature de l'échantillon : Ech. industriel liquide |
| Prélèvement assuré par : le client le 03/03/2011 |
| Réception au laboratoire : 09/03/2011 |
| Demandeur de l'analyse : Autocontrôle |
| Copie des résultats à : SOBEGI - LCE |

RAPPORT D'ANALYSE

N° de Dossier : 135039
N° Echantillon : 1
Page N° : 1/2

Annexe 1

SOBEGI - LCE
Hervé GARRAUD

Laboratoire de Contrôle et Environnement
Pôle IV - avenue du lac
64150 MOURENX

Responsabilité technique des analyses :

Chimie de l'environnement : C. MARQUASSUZAA - Christine PALE - Hugo LALANNE - Lionel POUCHOU

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|--|--|----------|----------------------------|
| BILAN IONIQUE ET MINERAL | | | |
| Anions minéraux | | | |
| L Bromures | < 10 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L Chlorures | 112 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L Nitrates * | < 5 | mg NO3/l | NF EN ISO 10304 |
| * (équivalent à <11,07 mg N/l) | | | |
| L Orthophosphates | < 0,06 | mg PO4/l | CHR/MO17 par spectrométrie |
| L Sulfates | 19,9 | mg SO4/l | NF EN ISO 10304 |
| L Thiosulfate | 167 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| Préparation des échantillons pour l'analyse de métaux | | | |
| L Minéralisation | attaque à l'acide nitrique à 102°C. | | Méthode Interne |
| Métaux | | | |
| L Fer | 175 | µg/l | NF EN ISO 11895 |
| L Strontium | 10,3 | µg/l | NF EN ISO 11895 |
| Produits minéraux | | | |
| L Calcium | 1,2 | mg/l | NF EN ISO 11895 |
| L Potassium | 0,31 | mg/l | NF EN ISO 11895 |
| L Magnésium | < 0,5 | mg/l | NF EN ISO 11895 |
| L Sodium | 1,14 | g/l | NF EN ISO 11895 |
| Cations après combustion | | | |
| L Extraction | injection directe sur la chaîne analytique | | méthode interne |
| PARAMETRES GLOBAUX | | | |
| Paramètres globaux | | | |
| L Matières En Suspension * | 25 | mg/l | NF EN 872 |
| * Filtre de marque GELMAN type A/E | | | |
| L pH | 12 | | NF T 90-008 |
| L RH | 4 | | méthode interne |
| L Sels dissous | 4451 | µS/cm | NT T 90-111 |
| L Température de l'échantillon * | 21 | °C | . |
| * Température lors de la mesure du pH et/ou de la conductivité | | | |

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|------------------------------------|----------|----------------------|--|
| Indices globaux | | | |
| L Cyanures Totaux | < 10 | mg CN/l | NF EN ISO 14403 |
| L Indios d'hydrocarbures | 23,87 | mg/l | NF ISO 9377-2 |
| L Indios phénols * | < 10 | mg/L | NF EN ISO 14402 (flux continu Bioritech) |
| * Ech. stabilisée (MJP04/CuS04) | | | |
| COMPOSES ORGANIQUES DIVERS | | | |
| Produits organiques divers | | | |
| L Acide acétique | 12,5 | mg/l | Méthode Interne |
| L Acide formique | < 25 | mg/l | méthode interne |
| L Acide propionique | < 25 | mg/l | méthode interne |
| Paramètres mesurés sur site | | | |
| L Oxygène dissous | < 0,1 | mg O ₂ /L | NF EN 25814 |
| L Différence de potentiel | -450 | mV | méthode interne |

Commentaires

Dosage des sels dissous : conductivité théorique ramenée à 20 °C

à Lagor, le 03/05/2011

Le Directeur général

 Votre satisfaction est notre principal préoccupation
 écrivez pas à notre adresse vos remarques

 Agré par le Ministère de la Santé et des Sports
 Agré par le Ministère de l'Énergie, de l'Électricité,
 de l'Équipement Durable et de l'Aménagement de Territoire
 Agré par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
 Agré par l'université de Bordeaux

Afin de contribuer au respect de l'environnement, votre bulletin d'analyse est imprimé sur du papier recyclé, en toute sérénité.

 ACCREDITATION
 LAGOR : I-1173
 TARBES : I-1069
 AGEN : I-2027
 LISTE DES SITES
 ACCREDITES ET
 PORTÉE
 DISPONIBLE SUR
 WWW.COFRAC.FR

S. GAUTRON

 Le rapport ne concerne que les échantillons soumis à analyse.
 La reproduction de ce rapport est autorisée que sous sa forme intégrale et avec l'autorisation du laboratoire.
 L'accréditation de la société FRANS de COFRAC atteste de la compétence du laboratoire pour les seules analyses couvertes par
 l'accréditation.
 La portée des applications et des accréditations, ainsi que les inscriptions de mesure, sont disponibles sur demande.
 Sites d'analyse : L pour Lagor, T pour Tarbes, A pour Agen, ST pour les sous-stations.

Destinataire / To JC MIQUEU

Copie / Copy G LE MOAL - A. KARSENTY
M CAETANO

Expéditeur / From H GARRAUD - C. DEFALQUE

Nom / Name

Service / Department LCE

Références / References CD-12.005

Date 23 janvier 2012

Objet / Subject Auto surveillance : analyses injection C4000
Semestre 2

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 2^{ème} prélèvement pour l'année 2011 a été réalisé le 24 novembre dernier.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 109 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor (LDP) Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, potentiel redox, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures (analyses sous traitées pour LCE).

L'échantillon du LCE a été prélevé quelques minutes avant celui de LDP.

Le tableau suivant récapitule les résultats d'analyses des 2 laboratoires. Il met en évidence des écarts de mesures entre les 2 laboratoires pour (en annexe, résultats d'analyses du LDP) :

- MES, facteur 10. Cause possible : Hétérogénéité échantillon
- Hydrocarbure, facteur 100. Cet écart est comparable à celui de la dernière campagne de début d'année. Il est précisé dans la norme utilisée que dans le cas d'eaux résiduaires très polluées, une perte de rendement peut se produire. Ces échantillons sont bi phasiques, la norme ne devrait pas être applicable et rend la comparaison des résultats entre les 2 laboratoires non significative.

L'échantillon analysé au LCE était bi phasique avec 9 % hydrocarbures totaux en volumique.

- Chlorure, nitrates : Les limites de quantification pour le Laboratoire Départemental des Pyrénées sont élevées en raison de la matrice et des dilutions nécessaires.
- Sulfate, facteur 20. Thiosulfate, facteur 8. Salinité, facteur 5. Fer facteur 30. Causes possibles : Hétérogénéité échantillon, influence possible du délai de réalisation sur l'évolution de concentration.

| | | | LCE | LDP |
|-------------------------|-------|------------------|------------------|-----------|
| | | | Prélevé 24/11/11 | |
| | | | Lims | n°dossier |
| Déterminations | unité | Méthodes | 359582 | 161363 |
| pH | - | NFT 90-008 | 6,3 | |
| | | bandelette | | 6 |
| MES | mg/l | EN 872 | 1500 | 125 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 11000 | 119 |
| Hydrocarbures | %vol | Interne | 9 | |
| chlorures | mg/l | NF EN ISO 10304 | 5,5 | <200 |
| sulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 16 | 357 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 5 | 41,6 |
| nitrites | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | <100 |
| phosphates | mg/l | NF T 90-023 | <0,5 | |
| | | Spectrométrie | | <0,06 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | <10 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | <10 | 0,861 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | <10 | 8,78 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | <10 | <25 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 34,7 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 24 | 16,8 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | 1,91 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | 0,571 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | <0,2 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,0128 |
| cyanures | mg/l | méthode interne | <10 | <10 |
| phenols | mg/l | NF EN ISO 14402 | <10 | <10 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -343 | -133 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 0,54 | 0,24 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 96,6 | 437 |

Analyses sous traitées pour le dosage des phénols pour le LCE.

Une réclamation du Laboratoire Départemental des Pyrénées de Lagor en date du 21 décembre concernant les points suivants a été enregistrée :

- 1 - Différences de résultats d'analyses pour les paramètres suivants : salinité, fer, thiosulfates, iHC, MES, sulfate.
- 2 - LQ plus élevée ce semestre pour les chlorures et nitrates.
- 3 - Longueur délai pour les paramètres bromures, phosphates, température, O2 dissous, différence de potentiel.

Actions prévues :

- Audit du Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor pour cet échantillon prévu en ce début d'année compte tenu du non respect des délais et modifications de méthodes sans nous en informer (LQ méthode)
- Ajout dosé pour produits soufrés.

Annexe



RCS PAU 98 B 263 - N° SIRET 418 814 059 00014 - CODE APE 7120B
Rue des écoles - 64150 LAGOR Tel: 05-59-60-23-85 Fax: 05-59-60-74-42

| |
|--|
| Echantillon : LA 109 (C-4000) |
| Lieu de prélèvement : TOTAL LA102 Lagor |
| Nature de l'échantillon : Ech. industriel liquide |
| Prélèvement assuré par : le client le 24/11/2011 |
| Réception au laboratoire : 24/11/2011 |
| Demandeur de l'analyse : Autocontrôle |
| Copie des résultats à : SOBEGI - LCE |

RAPPORT D'ANALYSE

N° de Dossier 161363
N° Echantillon : 1
Page N°: 1/2

(Reçu sur S1

SOBEGI - LCE
Hervé GARRAUD

Laboratoire de Contrôle et Environnement
Pôle IV - avenue du lac
64150 MOURENX

Responsabilité technique des analyses :

Chimie de l'environnement : Hugo LALANNE - Isabelle DURAND - Lionel POUCHOU - S. CASSOURET

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|------------|----------|-------|---------|
|------------|----------|-------|---------|

BILAN IONIQUE ET MINERAL

Anions minéraux

| | | | | |
|---|--|--------|----------|----------------------------|
| L | Bromures | < 10 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Chlorures | < 200 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Nitrates ^a | < 100 | mg NO3/l | NF EN ISO 10304 |
| | ^a (équivalent à <226 mg N/l) | | | |
| L | Orthophosphates | < 0,06 | mg PO4/l | CHR/MO17 par spectrométrie |
| L | Sulfates | 357 | mg SO4/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Thiosulfate | 41,6 | mg/l | NF EN ISO 10304 |

Préparation des échantillons pour l'analyse de métaux

| | | | | |
|---|----------------|----------------------------------|--|-----------------|
| L | Minéralisation | Attaque à l'eau régale à 102 °C. | | Méthode interne |
|---|----------------|----------------------------------|--|-----------------|

Métaux

| | | | | |
|---|-----------|-------|------|-----------------|
| L | Fer | 34700 | µg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Strontium | 12,8 | µg/l | NF EN ISO 11885 |

Produits minéraux

| | | | | |
|---|-----------|-------|------|-----------------|
| L | Calcium | 1,91 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Potassium | < 0,2 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Magnésium | 0,571 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Sodium | 16,8 | mg/l | NF EN ISO 11885 |

Cations après combustion

| | | | | |
|---|------------|---|--|-----------------|
| L | Extraction | Injection après dilution sur la chaîne analytique | | Méthode Interne |
|---|------------|---|--|-----------------|

PARAMETRES GLOBAUX

Paramètres globaux

| | | | | |
|---|---|-----------------------------|-------|-----------------|
| L | Matières En Suspension ^a | 125 | mg/l | NF EN 872 |
| | ^a Filtre de marque GELMAN type A/E | | | |
| L | pH | pH mesuré à la bandette : 6 | | NF T 90-008 |
| L | rH | 15 | | Méthode Interne |
| L | Sels dissous | 437 | µS/cm | NT T 90-111 |
| L | Température de l'échantillon ^a | non mesurée | | |
| | ^a Température lors de la mesure du pH et/ou de la conductivité | | | |

Indices globaux

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|------------|----------|-------|---------|
|------------|----------|-------|---------|

Indices globaux (suite)

| | | | | |
|---|------------------------|------|---------|--|
| L | Cyanures Totaux | < 10 | mg CN/l | NF EN ISO 14403 |
| L | Indice d'hydrocarbures | 119 | mg/l | NF ISO 9377-2 |
| L | Indice phénols * | < 10 | mg/L | NF EN ISO 14402 (flux continu Bioritech) |

* Ech. stabilisé (H3PO4/CuSO4)

COMPOSES ORGANIQUES DIVERS**Produits organiques divers**

| | | | | |
|---|-------------------|-------|------|-----------------|
| L | Acide acétique | 8,78 | mg/l | Méthode Interne |
| L | Acide formique | 0,861 | mg/l | Méthode Interne |
| L | Acide propionique | < 25 | mg/l | Méthode Interne |

Paramètres mesurés sur site

| | | | | |
|---|-------------------------|------|------|-----------------|
| L | Oxygène dissous | 0,24 | mg/l | NF EN 25814 |
| L | Différence de potentiel | -133 | mV | Méthode Interne |

Commentaires

Dosage des sels dissous : conductivité théorique ramenée à 20 °C

| | |
|--------------------------|--|
| Destinataire / To | JC MIQUEU |
| Copie / Copy | G LE MOAL - A. KARSENTY M CAETANO |
| Expéditeur / From | H GARRAUD - C. DEFALQUE |
| Nom / Name | |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | CD-12.042 |
| Date | 7 juin 2012 |
| Objet / Subject | Auto surveillance : analyses injection C 4000. |

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 1er prélèvement pour l'année 2012 a été réalisé le 15 mars dernier.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor. Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, potentiel redox, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Habituellement l'échantillon du LCE était prélevé quelques minutes avant celui de LDP. Cette année nous avons changé cette manière de procéder dans le but de vérifier l'impact sur les résultats afin d'avoir l'échantillon le plus similaire possible entre les 2 laboratoires. La totalité des flacon LCE et LDP ont été prélevés alternativement : 1LCE, 1LDP ...

L'échantillon est bi phasique à 17% volumique en phase organique.

Le tableau en annexe 1 récapitule les résultats d'analyses des 2 laboratoires met en évidence des écarts de mesures entre les 2 laboratoires pour les MES, bromure et acétate.

MES, facteur 30. Cause possible : Échantillon bi phasique. Les résultats sont néanmoins inférieurs à la spécification qui est de 600 mg/l

Bromure et acétate : le facteur dilution des échantillons pour analyses pourrait peut être expliquer les écarts

Nitrate : Présence détectée par LDP et non LCE, possibilité d'oxydation des nitrites ? Peu probable car non détecté au LCE.

Informations complémentaires :

Hydrocarbure : La norme ne devrait pas être applicable pour ce type d'échantillons bi phasiques. Les résultats du tableau ci-après sont des mesures d'hydrocarbures selon la norme NF ISO 9377-2 qui dose les HC de C10 à C40.

Chlorure, sulfates et acides carboxyliques : Les limites de quantification pour le Laboratoire Départemental des

Le changement dans le mode de prélever a peut être contribué à diminuer les écarts de résultats d'analyses entre les 2 laboratoires par rapport aux années précédentes notamment pour le dosage des hydrocarbures, ceci dit l'état bi phasique de l'échantillon explique probablement les écarts restants.

Bulletin du laboratoire de Lagor est en annexe 2.

| Déterminations | unité | Méthodes | LCE | LDP |
|--------------------------------|-------|------------------|-----------------|----------------|
| | | | Prélevé 15/3/12 | |
| | | | Lims | n°dossier |
| | | | 368608 | 170325 |
| pH | - | NFT 90-008 | 9,1 | 8,67 |
| MES | mg/l | EN 872 | 15 | 449 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 4800 | 7168 |
| Hydrocarbures | %vol | Interne | 17 | |
| chlorures | g/l | NF EN ISO 10304 | 69 | <200 |
| sulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 68 | <200 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 826 | <500 |
| nitrates | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | 100 |
| phosphates | mg/l | NF T 90-023 | <0,5 | <6 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | 70,7 |
| formiates | mg/l | chromato ionique | <10 | <500 |
| acétates | mg/l | chromato ionique | 547 | 6240 |
| propioniates | mg/l | chromato ionique | <10 | <500 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1000 | 62,3 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 4030 | 2960 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2,00 | 1,95 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2,0 | <0,5 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2,0 | 2,8 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1,0 | 0,0818 |
| cyanures* | µg/l | méthode interne | <10 | <10 |
| phenols * | µg/l | NF EN ISO 14402 | <10 | <10 |
| potentiel rédox | mV | in situ | -420 | -185 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25813 | 2,51 | <0,5 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 12948 | 11365 |

* : Analyses sous traitées pour LCE



RCS PAU 98 B 263 - N° SIRET 418 814 059 00014 - CODE APE 7120B
Rue des écoles - 64150 LAGOR Tel: 05-59-60-23-85 Fax: 05-59-60-74-42

RAPPORT D'ANALYSE

N° de Dossier 170325
N° Echantillon : 1
Page N°: 1/2

| |
|--|
| Echantillon : LA102 - C4000 |
| Lieu de prélèvement : SOBEGI |
| Nature de l'échantillon : Eau polluée |
| Prélèvement assuré par : le client le 15/03/2012 |
| Réception au laboratoire : 15/03/2012 |
| Demandeur de l'analyse : Autocontrôle |
| Copie des résultats à : SOBEGI - LCE |

SOBEGI - LCE
Corinne DEFALQUE

Laboratoire de controle - Pôle IV
RD 281 - avenue du Lac
64150 MOURENX

Responsabilité technique des analyses :

Chimie de l'environnement : Christine PALE - Hugo LALANNE - Lionel POUCHOU - S. CASSOURET

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|------------|----------|-------|---------|
|------------|----------|-------|---------|

BILAN IONIQUE ET MINERAL

Anions minéraux

| | | | | |
|---|-----------------------|-------|----------|----------------------------|
| L | Bromures | 70,7 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L C* | Chlorures | < 200 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L C* | Nitrates ^a | 100 | mg NO3/l | NF EN ISO 10304 |
| <i>^a (équivalent à 22,6 mg N/l)</i> | | | | |
| L | Orthophosphates | | <6mg/l | CHR/MO06 par spectrométrie |
| L C* | Sulfates | < 200 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Thiosulfate | < 500 | mg/l | NF EN ISO 10304 |

Préparation des échantillons pour l'analyse de métaux

| | | | | |
|---|----------------|---|--|-----------------|
| L | Minéralisation | Attaque à l'eau régale à 102 °C (méthode interne MAM/FTA-06 selon NF EN ISO 15587-1). | | Méthode interne |
|---|----------------|---|--|-----------------|

Métaux

| | | | | |
|------|-------------|------|------|-----------------|
| L C* | Fer dissous | 62,3 | µg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Strontium | 81,8 | µg/l | NF EN ISO 11885 |

Produits minéraux

| | | | | |
|------|-----------|-------|------|-----------------|
| L C* | Calcium | 1,95 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L C* | Potassium | 2,8 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L C* | Magnésium | < 0,5 | mg/l | NF EN ISO 11885 |
| L C* | Sodium | 2960 | mg/l | NF EN ISO 11885 |

Cations après combustion

| | | | | |
|---|------------|-----------------------------------|--|-----------------|
| L | Extraction | Dilution adaptée de l'échantillon | | Méthode Interne |
|---|------------|-----------------------------------|--|-----------------|

PARAMETRES GLOBAUX

Paramètres globaux

| | | | | |
|--|---|-------|-------|-----------------|
| L | Matières En Suspension ^a | 449 | mg/l | NF EN 872 |
| <i>^a Filtre de marque GELMAN type A/E</i> | | | | |
| L | pH | 8,67 | | NF T 90-008 |
| L | rH | 18 | | Méthode Interne |
| L | Sels dissous | 11365 | µS/cm | NT T 90-111 |
| L | Température de l'échantillon ^a | 18,4 | °C | . |

* Température lors de la mesure du pH et/ou de la conductivité

Indices globaux

| | | | | |
|------|------------------------|------|------|--|
| L | Cyanures Totaux | < 10 | mg/l | NF EN ISO 14403 |
| L | Indice d'hydrocarbures | 7168 | mg/l | MAO/MO15 selon NF EN 9377-2 |
| L C* | Indice phénols * | < 10 | mg/L | NF EN ISO 14402 (flux continu Bioritech) |

* Ech. stabilisé (H3PO4/CuSO4)

COMPOSES ORGANIQUES DIVERS
Produits organiques divers

| | | | | |
|---|-------------------|-------|------|-----------------|
| L | Acide acétique | 6240 | mg/l | Méthode Interne |
| L | Acide formique | < 500 | mg/l | Méthode Interne |
| L | Acide propionique | < 500 | mg/l | Méthode Interne |

Paramètres mesurés sur site

| | | | | |
|---|-------------------------|------|---------|-----------------|
| L | Oxygène dissous | <0,5 | mg O2/l | NF EN 25813 |
| L | Différence de potentiel | -185 | mV | Méthode Interne |

Commentaires

L'ensemble des paramètres organiques sont mis en analyse dans un délai maximum de 48H dès la réception des échantillons sauf pour les paramètres concernant la méthode MAO/MO04 où le délai maximum est fixé à 5 jours ouvrés. Dosage des sels dissous : conductivité théorique ramenée à 20 °C

| | |
|--------------------------|---|
| Destinataire / To | JC MIQUEU |
| Copie / Copy | G LE MOAL - A. KARSENTY M CAETANO |
| Expéditeur / From | H GARRAUD - C. DEFALQUE |
| Nom / Name | |
| Service / Department | LCE |
| Références / References | CD-13.005 |
| Date | 1 mars 2013 |
| Objet / Subject | Auto surveillance : analyses injection C 4000 TEPF Lacq. |

Dans le cadre du calage de l'auto surveillance prévu dans l'arrêté préfectoral "injection d'effluents dans le C4000", le 2^{ème} prélèvement pour l'année 2012 a été réalisé le 22 novembre.

Les prélèvements, mesures et analyses ont été réalisés sur le puits LA 102 conjointement avec le Laboratoire Départemental des Pyrénées à Lagor. Ce laboratoire extérieur est agréé par le Ministère chargé de l'Environnement.

Le programme d'analyses reprend les différents paramètres mentionnés dans l'arrêté préfectoral, à savoir : pH, potentiel redox, MES, salinité, oxygène dissous, cations, anions, hydrocarbures, phénols et cyanures.

Le tableau en annexe 1 récapitule les résultats d'analyses des 2 laboratoires met en évidence des écarts de mesures entre les 2 laboratoires pour le pH, hydrocarbure, chlorure.

Les analyses cyanures et phénol du LCE ont été sous traitées.

pH : Les 2 laboratoires utilisent la même norme NF T 90-008. Le tableau en annexe 2 montre les écarts depuis 2010 entre les 2 laboratoires. Cet écart était de 0.4 pour le prélèvement de l'année et de 1 pour le 2^{ème} semestre. Il a été plus important qu'en 2010 (|écart mesure LDP et LCE| : 0.3) et moins qu'en mars 2011 (|écart mesure LDP et LCE| : 3.5). L'incertitude pour LDP sur cette mesure est de 30%, la mesure du LCE 8.7 est comprise dans la fourchette de 30% : 6.83 à 12.67.

Hydrocarbure : Les résultats du tableau en annexe 1 sont des mesures des hydrocarbures selon la norme NF ISO 9377-2. Il y a un écart significatif entre les 2 laboratoires, ceci dit les valeurs de ce semestre sont plus faibles que le semestre précédent (LCE 4800 mg/l et 7168 mg/l). Au LCE pour ce type d'échantillon nous n'utilisons pas cette méthode mais une méthode interne qui dose les hydrocarbures totaux. Avec cette méthode, le résultat pour cet échantillon est de 180mg/l, il est logiquement supérieur car dose tous les hydrocarbures alors que la norme

demandée pour l'autocontrôle dose les hydrocarbures de C10 à C40. Les incertitudes sur les mesures des 2 laboratoires (LDP : 20% et LCE : 38%) n'expliquent pas la différence entre les 2 résultats. L'hypothèse principale serait la différence entre les 2 échantillonnages.

Chlorure : L'écart entre les 2 laboratoires est significatif, cependant les 2 mesures sont très inférieures à la spécification qui est 50g/l. Les incertitudes sur les mesures des 2 laboratoires (LDP : 30%) n'expliquent pas la différence entre les 2 résultats. L'hypothèse principale serait la différence entre les 2 échantillonnages.

Salinité : Ecart de mesure entre les 2 laboratoires, facteur 2, la même norme est utilisée par les 2 laboratoires .

Au LCE, l'échantillon a été dilué au 100^{ème}, ce qui pourrait expliquer l'écart. Incertitude 30% LDP.

La balance ionique donne 75% pour le LCE et 48% pour le LDP, la différence pourrait en l'occurrence s'expliquer par une surestimation des chlorures par LDP.

Ecarts d'oxygène dissout similaires aux autres campagnes entre les 2 laboratoires. Les limites de quantification du laboratoire des Pyrénées peuvent être importante du fait de la toxicité des échantillons C4000. Pas d'incertitudes pour cette mesure.

Bulletin du laboratoire des Pyrénées est en annexe 3

Annexe 4 bulletin analyses LCE

| |
|-----------------|
| Annexe 1 |
|-----------------|

| Déterminations | unité | Méthodes | LCE | LDP |
|--------------------------------|-------|-----------------|-----------------|---------------------|
| | | | Lims 388052 | n°dossier 195380 |
| pH | - | NFT 90-008 | 8,7 | 9,75 |
| MES | mg/l | EN 872 | 92 | 78 |
| Hydrocarbures | mg/l | NF ISO 9377-2 | 34 | 130,5 |
| chlorures | mg/l | NF EN ISO 10304 | 280 | 2032 |
| sulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 29 | <200 |
| thiosulfates | mg/l | NF EN ISO 10304 | 1476 | 729 |
| nitrates | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | <100 |
| phosphates | mg/l | NF T 90-023 | <0,5 | <0,6 |
| bromures | mg/l | NF EN ISO 10304 | <0,5 | 1,12* |
| formiates | mg/l | Méthode interne | <10 | <500 |
| acétates | mg/l | Méthode interne | 15 | 7,02 |
| propioniates | mg/l | Méthode interne | <10 | <500 |
| fer (dissous) | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,422 |
| sodium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 537 | 747 |
| calcium | mg/l | NF EN ISO 11885 | 3 | 4,05 |
| magnésium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | <1 |
| potassium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <2 | 1,1 |
| strontium | mg/l | NF EN ISO 11885 | <1 | 0,046 |
| cyanures | mg/l | NF EN ISO 14403 | <10 | <10 |
| phenols | mg/l | NF EN ISO 14402 | <0,01 | <0,01 |
| potentiel rédox | mV | Méthode interne | -408 | -430 |
| oxygène dissous | mg/l | NF EN 25814 | 3,13 | 0,8 |
| salinité (sels dissous) | µs/cm | FDT 90-111 | 5000 | 10373 |

* méthode interne

Annexe 2

| | pH LCE | pH LDP | Ecart entre LDP & LCE |
|-----------------|--------|--------|-----------------------|
| Semestre 1 2010 | 11.55 | 11.80 | 0.3 |
| Semestre 2 2010 | 6.90 | 6.64 | 0.3 |
| Semestre 1 2011 | 8.55 | 12 | 3.5 |
| Semestre 1 2012 | 9.1 | 8.67 | 0.4 |
| Semestre 2 2012 | 8.67 | 9.75 | 1.1 |

Annexe 3



RCS PAU 98 B 263 - N° SIRET 418 814 059 00014 - CODE APE 7120B
Rue des écoles - 64150 LAGOR Tél: 05 59 60 23 85 Fax: 05 59 60 74 42

RAPPORT D'ANALYSE

N° de Dossier 195380 Version N° 2
N° Echantillon : 1
Page N°: 1/2

| |
|--|
| Echantillon : LA102 - EAUX POLLUEES C4000 |
| Lieu de prélèvement : SOBEGI LCE |
| Nature de l'échantillon : Ech. industriel liquide |
| Prélèvement assuré par : le laboratoire (ROBIN Romain) le 22/11/2012 |
| Réception au laboratoire : 22/11/2012 |
| Demandeur de l'analyse : Autocontrôle |
| Copie des résultats à : SOBEGI - LCE |

SOBEGI - LCE
Corinne DEFALQUE

Laboratoire de controle - Pôle IV
RD 281 - avenue du Lac
64150 MOURENX

Responsabilité technique des analyses :

Chimie de l'environnement : C. MARQUASSUZAA - Christine PALE - Hugo LALANNE - Lionel POUCHOU

| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE | |
|--|--|---|----------|----------------------------|
| BILAN IONIQUE ET MINERAL | | | | |
| Anions minéraux | | | | |
| L | Bromures | 1,12 | mg/l | Méthode Interne |
| L | Chlorures | 2032 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Nitrates ^a | < 100 | mg NO3/l | NF EN ISO 10304 |
| | <i>^a (équivalent à <22,6 mg N/l)</i> | | | |
| L | Orthophosphates | < 0,6 | mg PO4/l | CHR/MO17 par spectrométrie |
| L | Sulfates | < 200 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| L | Thiosulfate | 729 | mg/l | NF EN ISO 10304 |
| Préparation des échantillons pour l'analyse de métaux | | | | |
| L | Minéralisation | Attaque à l'eau régale à 102 °C (méthode interne MAM/FTA-06 selon NF EN ISO 15507-1). | | Méthode interne |
| Métaux | | | | |
| L | Fer dissous | 422 | µg/l | NF EN ISO 11885 |
| L | Strontium | 45,7 | µg/l | NF EN ISO 11885 |
| Produits minéraux | | | | |
| L | Calcium | 4,05 | mg/L | NF EN ISO 11885 |
| L | Potassium | 1,1 | mg/L | NF EN ISO 11885 |
| L | Magnésium | < 1 | mg/l | NF EN ISO 11005 |
| L | Sodium | 747 | mg/L | NF EN ISO 11885 |
| Cations après combustion | | | | |
| L | Extraction | Dilution adaptée de l'échantillon | | Méthode Interne |
| PARAMETRES GLOBAUX | | | | |
| Paramètres globaux | | | | |
| L | Matières En Suspension ^a | 78 | mg/l | NF EN 872 |
| | <i>^a Filtre de marque GELMAN type A/E</i> | | | |
| L | pH | 9,75 | | NF T 90-008 |
| L | rH | 12 | | Méthode Interne |
| L | Sels dissous | 10373 | µS/cm | NT T 90-111 |
| L | Température de l'échantillon ^a | 16,7 | °C | Méthode Interne |
| | <i>^a Température lors de la mesure du pH et/ou de la conductivité</i> | | | |

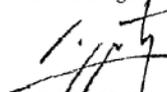
| PARAMETRES | RESULTAT | UNITE | METHODE |
|------------------------------------|----------|-------|--|
| Indices globaux | | | |
| L Cyanures Totaux | < 10 | mg/l | NF EN ISO 14403 |
| L Indice d'hydrocarbures | 130,5 | mg/l | NF ISO 9377-2 |
| L Indice phénols ^a | < 0,01 | mg/l | NF EN ISO 14402 (flux continu Bloritech) |
| * Ech. stabilisé (H3PO4/CuSO4) | | | |
| COMPOSES ORGANIQUES DIVERS | | | |
| Produits organiques divers | | | |
| L Acide acétique | 7,02 | mg/l | Méthode Interne |
| L Acide formique | < 500 | mg/l | Méthode Interne |
| L Acide propionique | < 500 | mg/l | Méthode Interne |
| Paramètres mesurés sur site | | | |
| L Oxygène dissous | 0,8 | mg/l | NF EN 25614 |
| L Différence de potentiel | -430 | mV | Méthode Interne |

Commentaires

L'ensemble des paramètres organiques sont mis en analyse dans un délai maximum de 48H dès la réception des échantillons sauf pour les paramètres concernant la méthode MAO/MO04 où le délai maximum est fixé à 5 jours ouvrés. Cette version (bulletin:N° 2) annule et remplace la précédente qu'il vous appartient de détruire.

à Lagor, le 28/12/2012

Le Directeur général


 S. GAUTRON

Votre satisfaction est notre principale préoccupation,
n'hésitez pas à nous adresser vos remarques

Agréé par le Ministère de la Santé et des Sports
 Agréé par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du
 Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
 Agréé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
 Agréé par l'autorité de sûreté nucléaire

ACCREDITATION
 LAGOR : 1-1173
 TARBE : 1-1059
 AGEN : 1-2027
 LISTE DES SITES
 ACCREDITES E1
 PORTEE
 DISPONIBLE SUR
 www.cofrac.fr

La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale et avec l'autorisation du laboratoire.
 L'accréditation de la section Essai de COFRAC atteste de la compétence du laboratoire pour les seules analyses couvertes par
 l'accréditation C*
 La portée des agréments et des accréditations, ainsi que les incertitudes de mesure, sont disponibles sur demande
 Sites d'analyses : L pour Lagor, T pour Tarbes, A pour Agen, ST pour les sous-traitances.

Afin de contribuer au respect de l'environnement, votre bulletin d'analyse est imprimé sur du papier recyclé, en recto verso.

Annexe 4

ENR-LCE-RAP-008-V02

Nom : TEPF
Contact : GUILHAUMA D.
Adresse : 64170 LACQ
Tél / Fax :
Mél : didier.guilhauma@total.com

Rapport d'essais N° 388052_V3*Annule et remplace la version précédente*

Référence client : Eaux polluées de LA 102
N° d'enregistrement échantillon LIMS : 388052
Type d'échantillon : EAU_LA102
Lieu de prélèvement : EAU-LA102
Date et heure du prélèvement : 22/11/2012 14:30
Date de réception au laboratoire : 22/11/2012
Référence devis associé si existant :

Résultats

| Paramètre | Méthode | Résultat | Unité | Spec. |
|--------------------------------|---------------------|----------|----------|---------|
| pH | NF T 90-008 | 8.70 | | >=6.50 |
| Température de mesure | NF T 90-008 | 23.1 | Degres C | |
| Matières en suspension (105°C) | NF EN 872 | 92 | mg/l | <=600.0 |
| Filtre Sartorius type | NF EN 872 | SM13440 | | |
| Délai Prélèv.-Analyse | NF EN 872 | <= 48 h. | | |
| AZOTE TOTAL | NF EN 12260 | 30.5 | mg/l | |
| Chlorures | NF EN ISO 10304-1 | 280 | mg/l | <=50000 |
| CYANURES | Sous-traitance - NF | <10 | mg/L | |
| PHENOLS | Sous-traitance - NF | <0.01 | mg/L | |
| Température | | 16.5 | Degres C | |
| Potentiel mesuré | Interne | -408 | mV | |

Le présent rapport ne concerne que les échantillons soumis à essais
 La non conformité d'un échantillon par rapport à une spécification fournie par le client est annotée par NC
 La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale et avec l'autorisation du laboratoire
 L'accréditation de la section Essais du COFRAC atteste de la compétence du laboratoire pour les seules analyses couvertes par l'accréditation et annoté par C* dans les résultats
 La portée des accréditations et les incertitudes de mesures sont disponibles sur demande


 Portée disponible sur
www.cofrac.fr

388052_V3 - Page 1 sur 2



ENR-LCE-RAP-008-V02

| Paramètre | Méthode | Résultat | Unité | Spec. |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------|--------|
| Salinité T. ramenée 20°C | FDT 90-111 | 5000 | uS/cm | |
| R-SH | | 156 | ppm | |
| H2S | | 1442 | ppm | <=4000 |
| AMMONIUM | NF EN ISO 14911 | 32.90 | mg/l | |
| Sodium | NF EN ISO 11885 | 537.1 | mg/l | |
| Potassium | NF EN ISO 11885 | <2.0 | mg/l | |
| Baryum | NF EN ISO 11885 | <1.0 | mg/l | |
| Calcium | NF EN ISO 11885 | 3.00 | mg/l | |
| Magnésium | NF EN ISO 11885 | <2.0 | mg/l | |
| FER | NF EN ISO 11885 | <1.0 | mg/L | <=3000 |
| STRONTIUM | NF EN ISO 11885 | <1.0 | mg/L | |
| ACIDE ACETIQUE | Interne | 15 | mg/l | |
| ACIDE FORMIQUE | Interne | <10 | mg/l | |
| ACIDE PROPIONIQUE | Interne | <10 | mg/l | |
| OXALATES | Interne | 7 | mg/l | |
| Nitrates | NF EN ISO 10304-2 | <0.5 | mg/l | |
| Nitrites | NF EN ISO 10304-2 | <0.5 | mg/l | |
| Phosphates | NF EN ISO 10304-2 | <0.5 | mg/l | |
| SULFITES | Interne | <5 | mg/l | |
| Sulfates | NF EN ISO 10304-2 | 29 | mg/l | |
| BROMURES | NF EN ISO 10304-2 | <0.5 | mg/l | |
| THIOSULFATES | NF EN ISO 10304-3 | 1476 | mg/l | |
| Alcalinité | NF EN ISO 9963-1 | 30.9 | meq/l | |
| Oxygène dissous | NF EN 25814 | 3.13 | mg/L | |
| Prélevé le | | 22-NOV-2012 14:30 | | |
| HYDROCARBURES | Interne | 180 | mg/l | |
| Indice d'hydrocarbure | NF EN ISO 9377-2 | 34 | mg/l | |
| Légers (<=C10) | NF EN ISO 9377-2 | OUI | | |
| Lourds (>=C40) | NF EN ISO 9377-2 | NON | | |
| Délai prélèv.-Extract. | NF EN ISO 9377-2 | > 4 jours | | |

Observations : Autocontrôle LA102

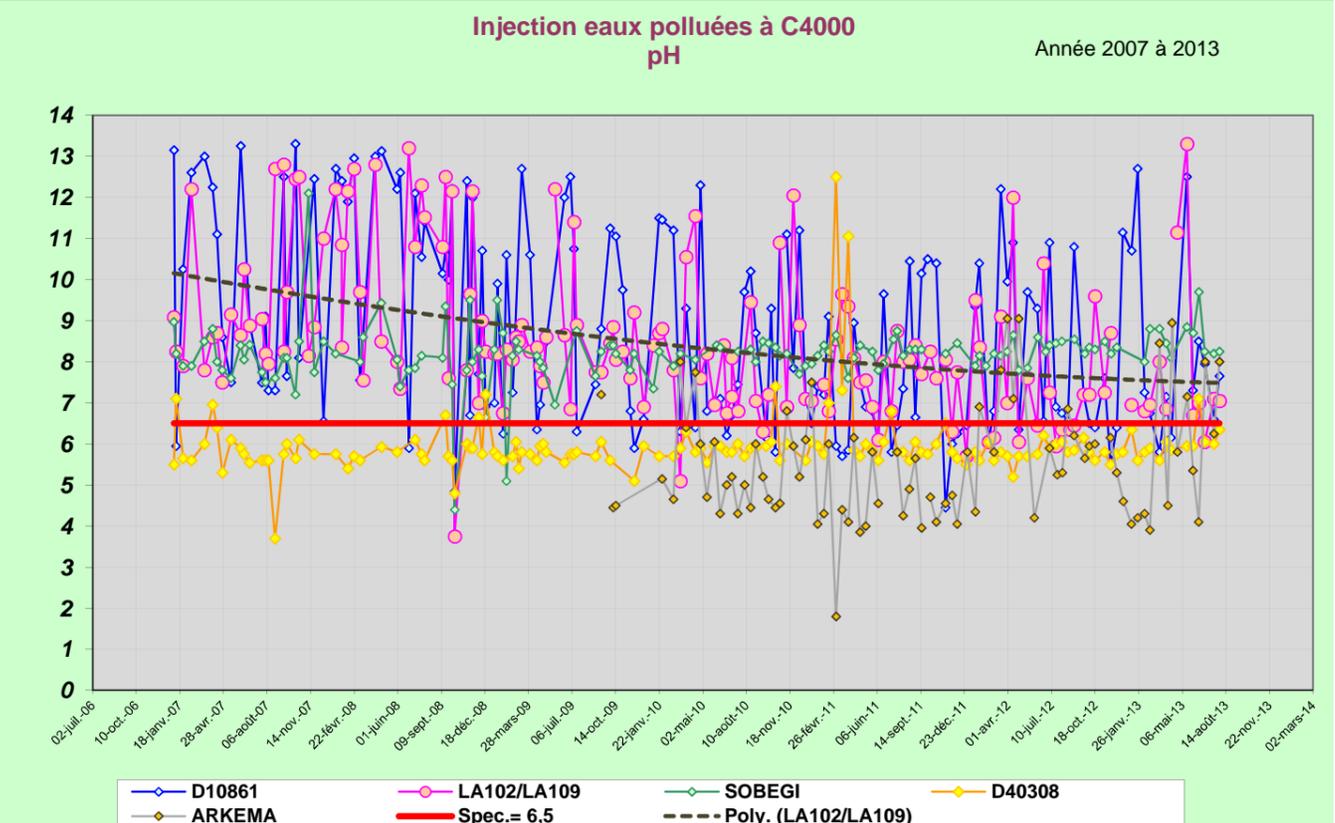
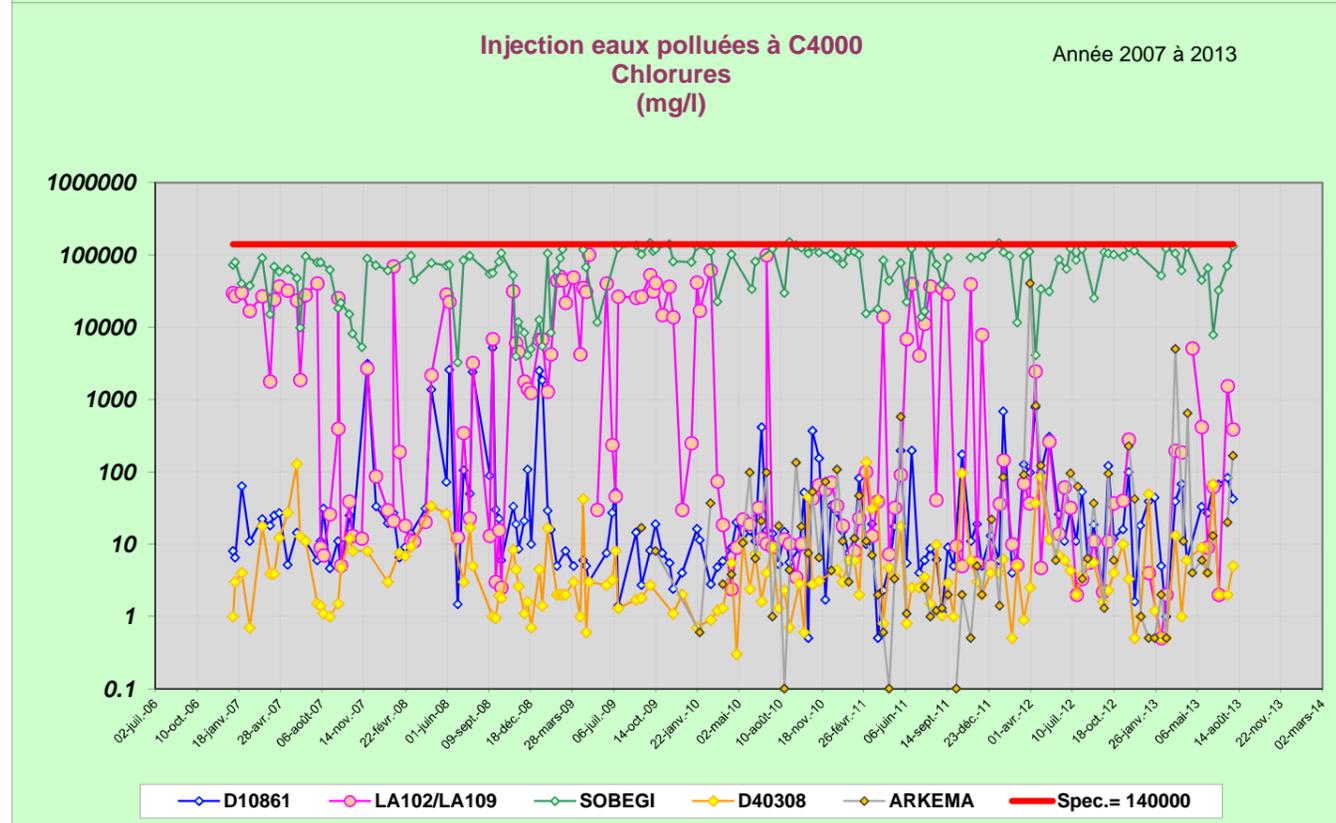
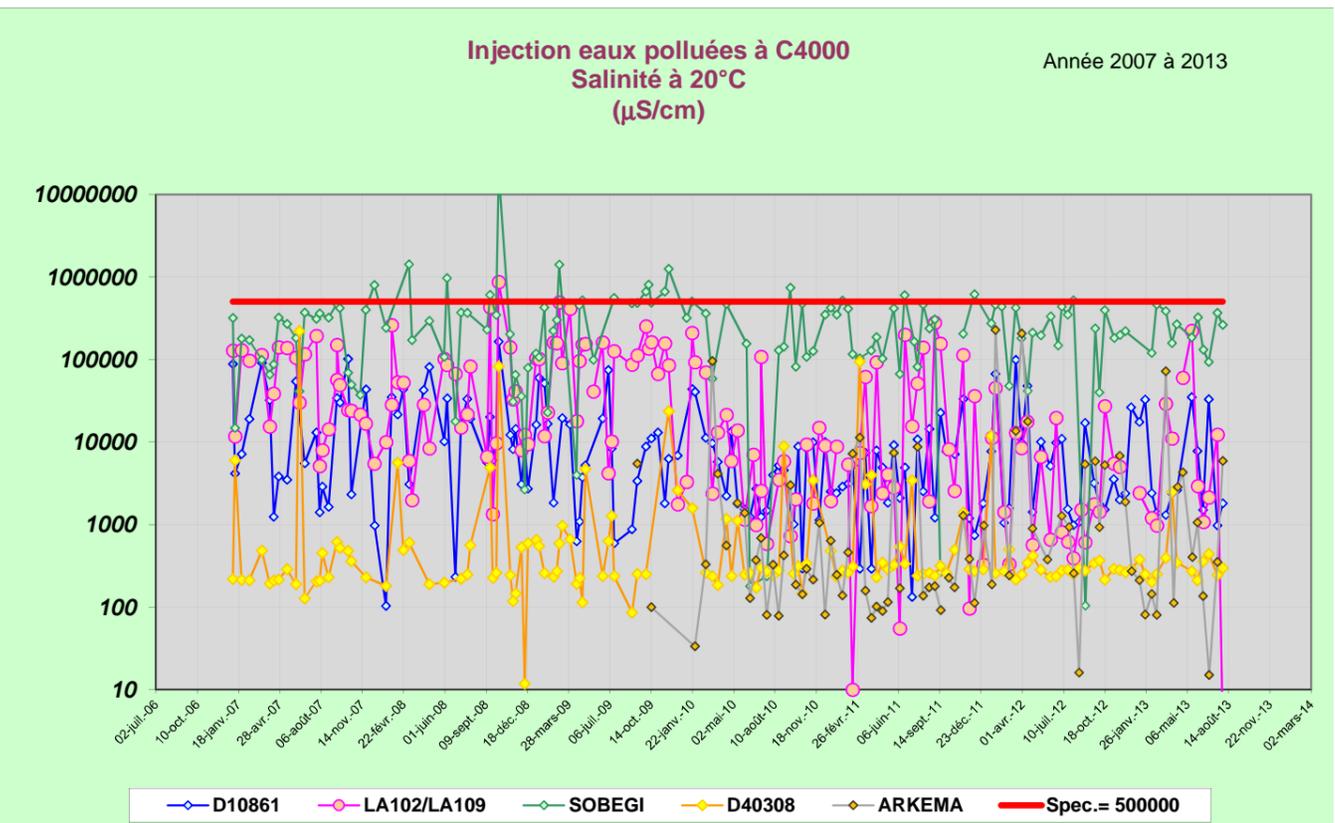
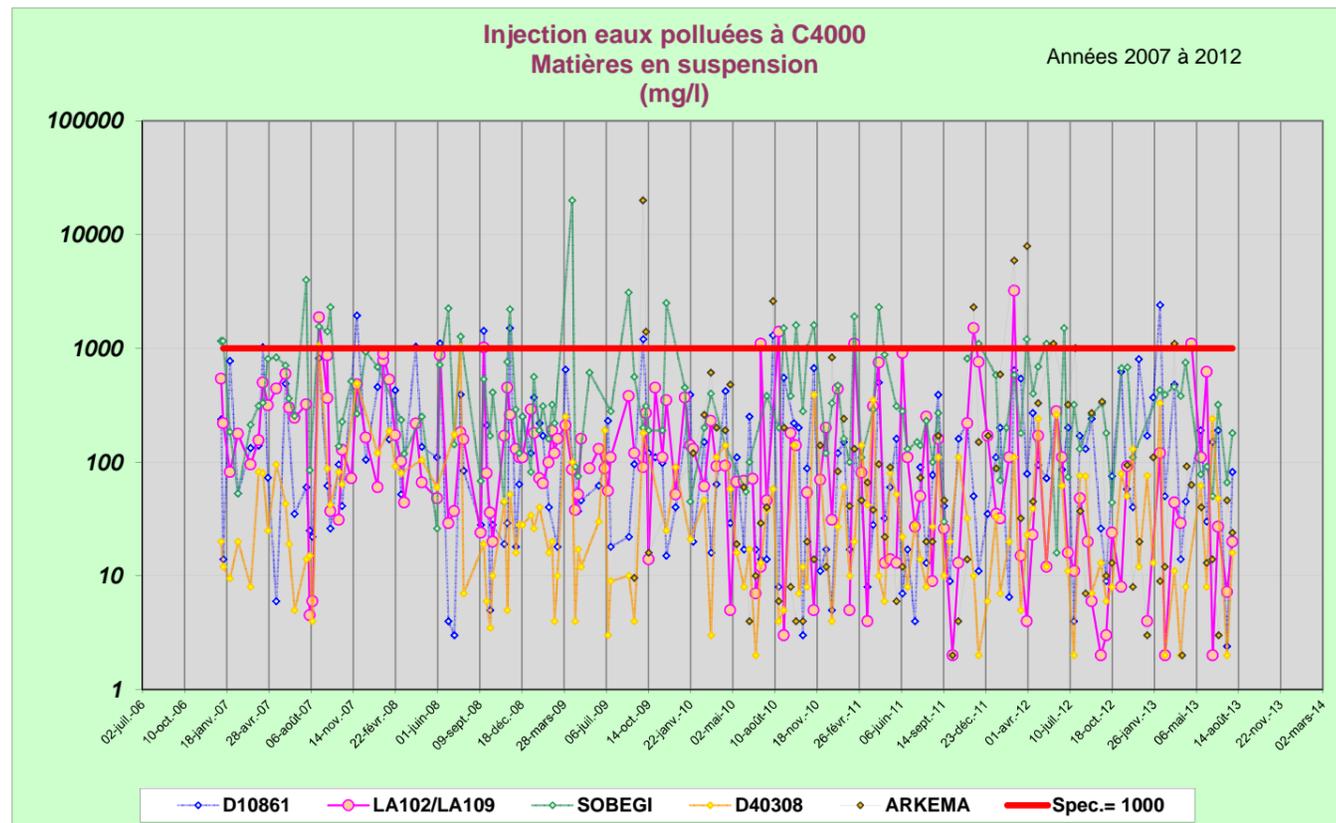
Le présent rapport ne concerne que les échantillons soumis à essais
 La non conformité d'un échantillon par rapport à une spécification fournie par le client est annotée par NC
 La reproduction de ce rapport n'est autorisée que sous sa forme intégrale et avec l'autorisation du laboratoire
 L'accréditation de la section Essais du COFRAC atteste de la compétence du laboratoire pour les seules analyses couvertes par l'accréditation et annoté par C* dans les résultats
 La portée des accréditations et les incertitudes de mesures sont disponibles sur demande

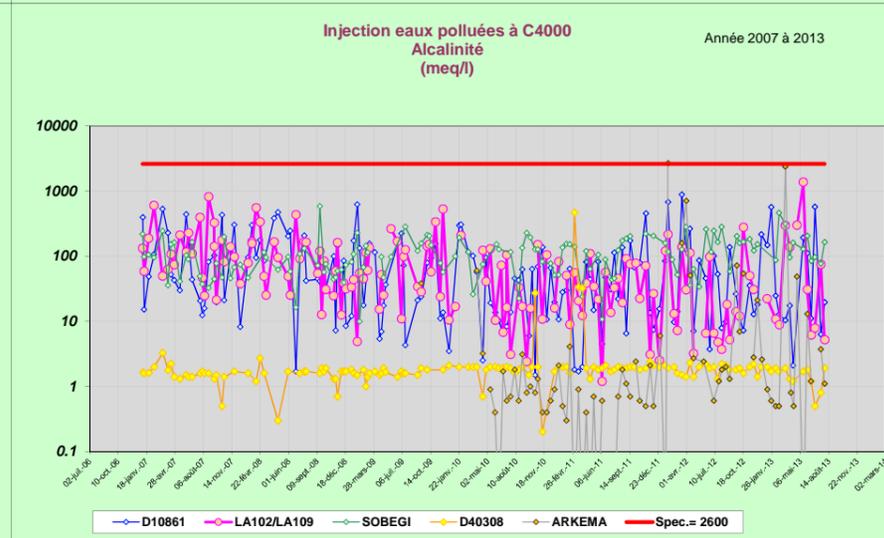
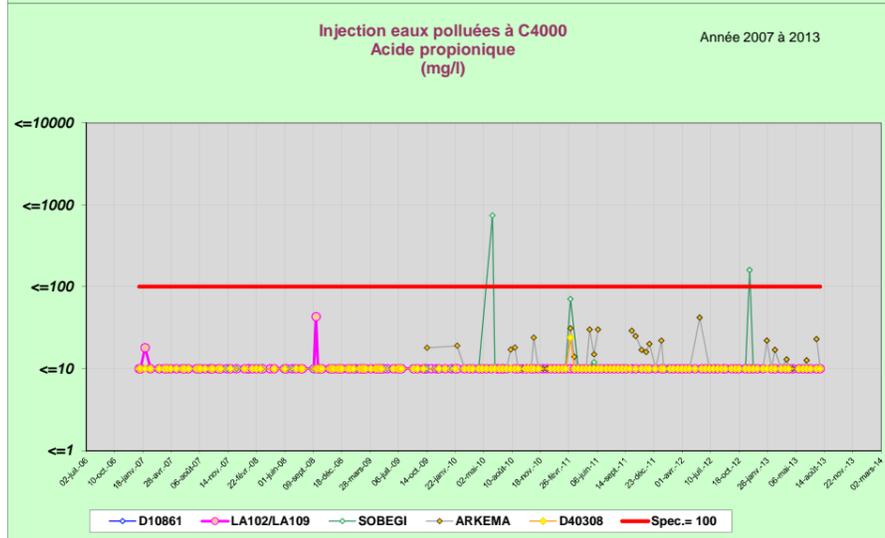
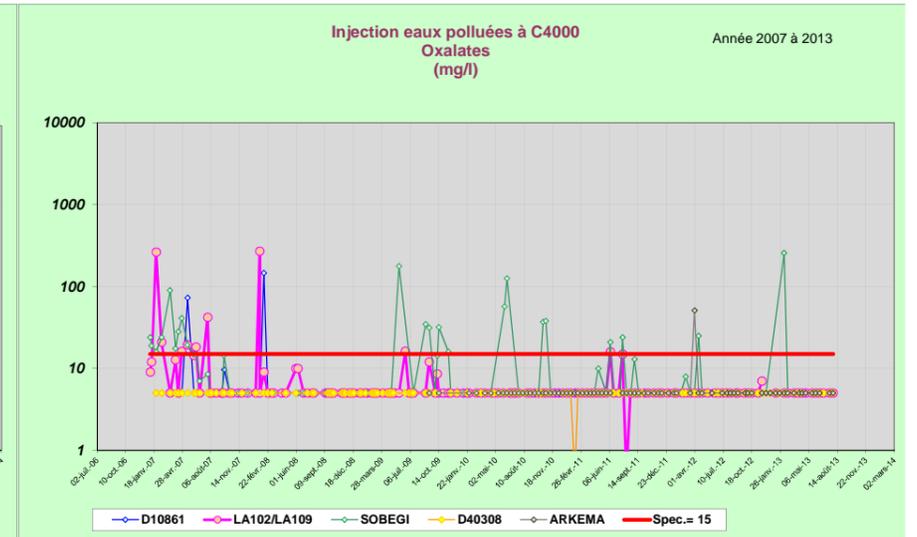
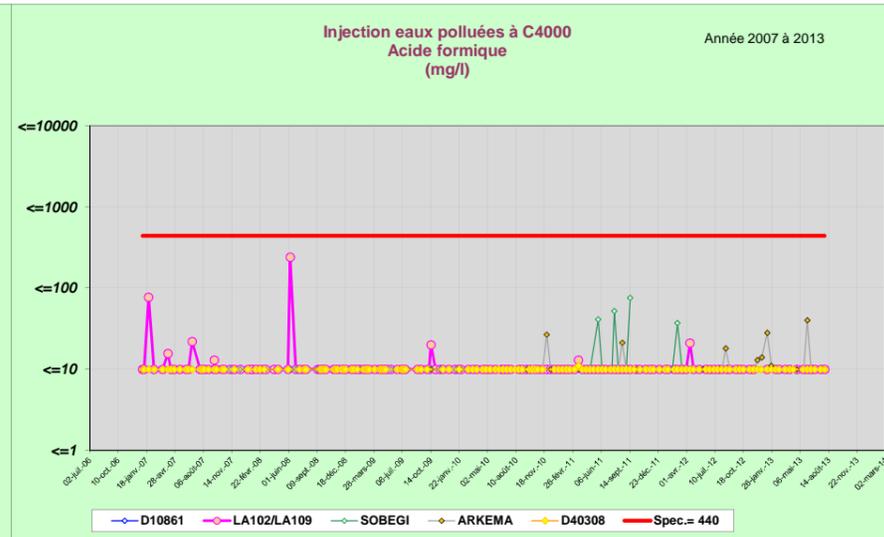
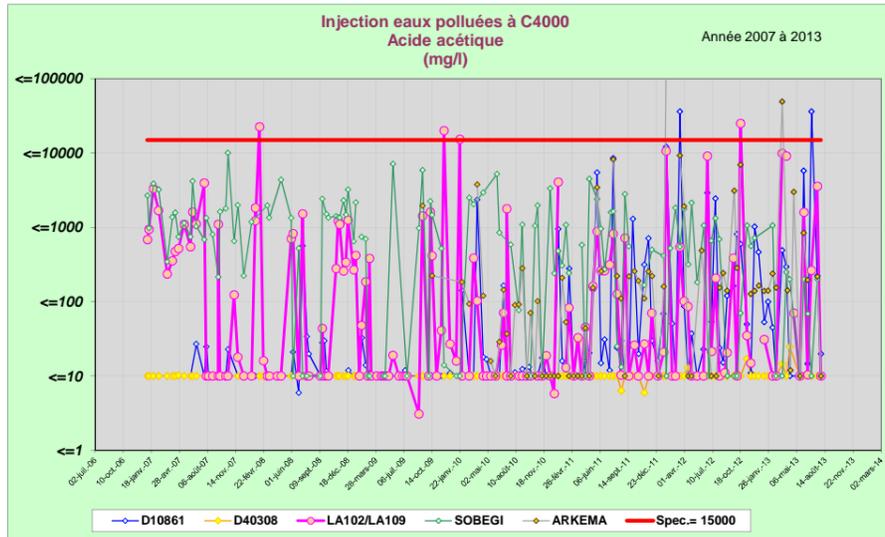


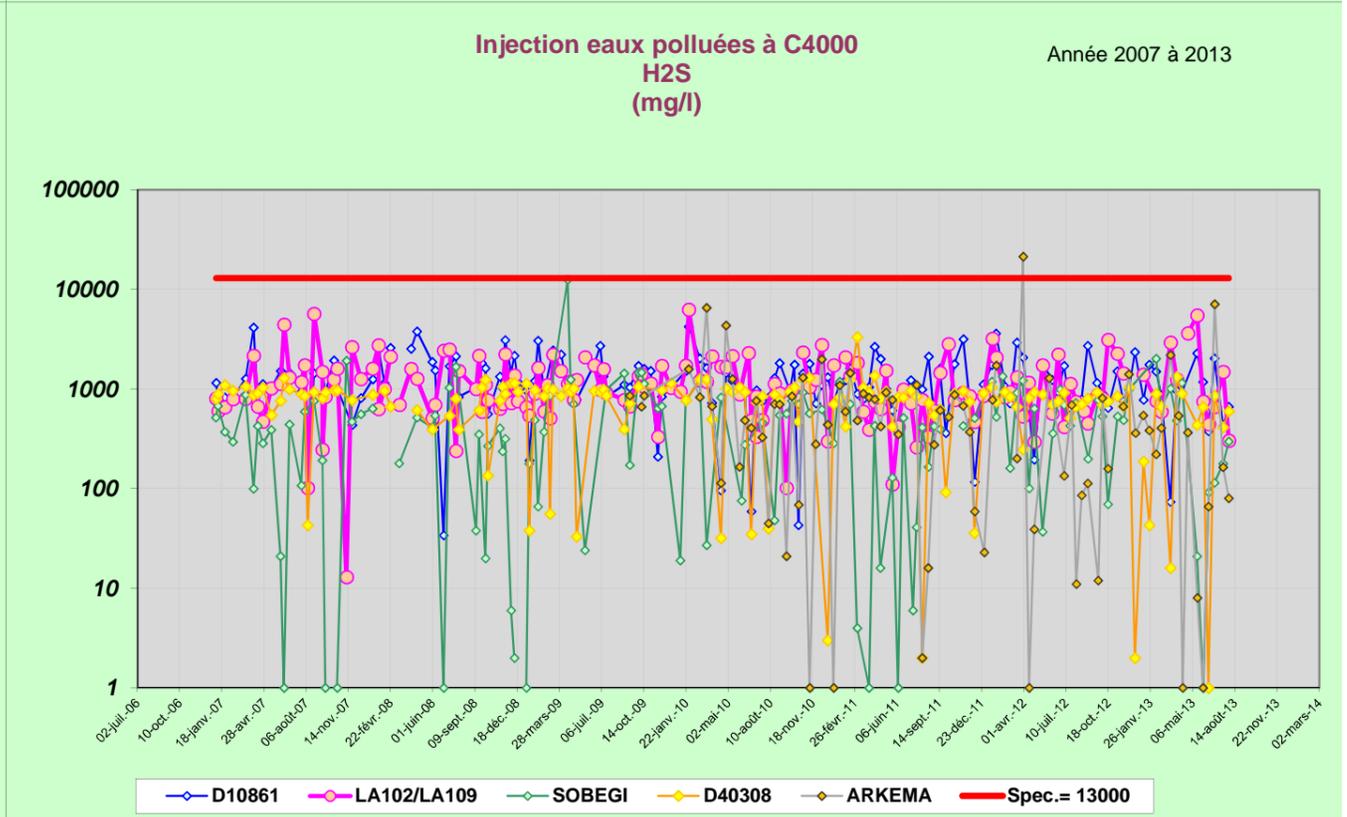
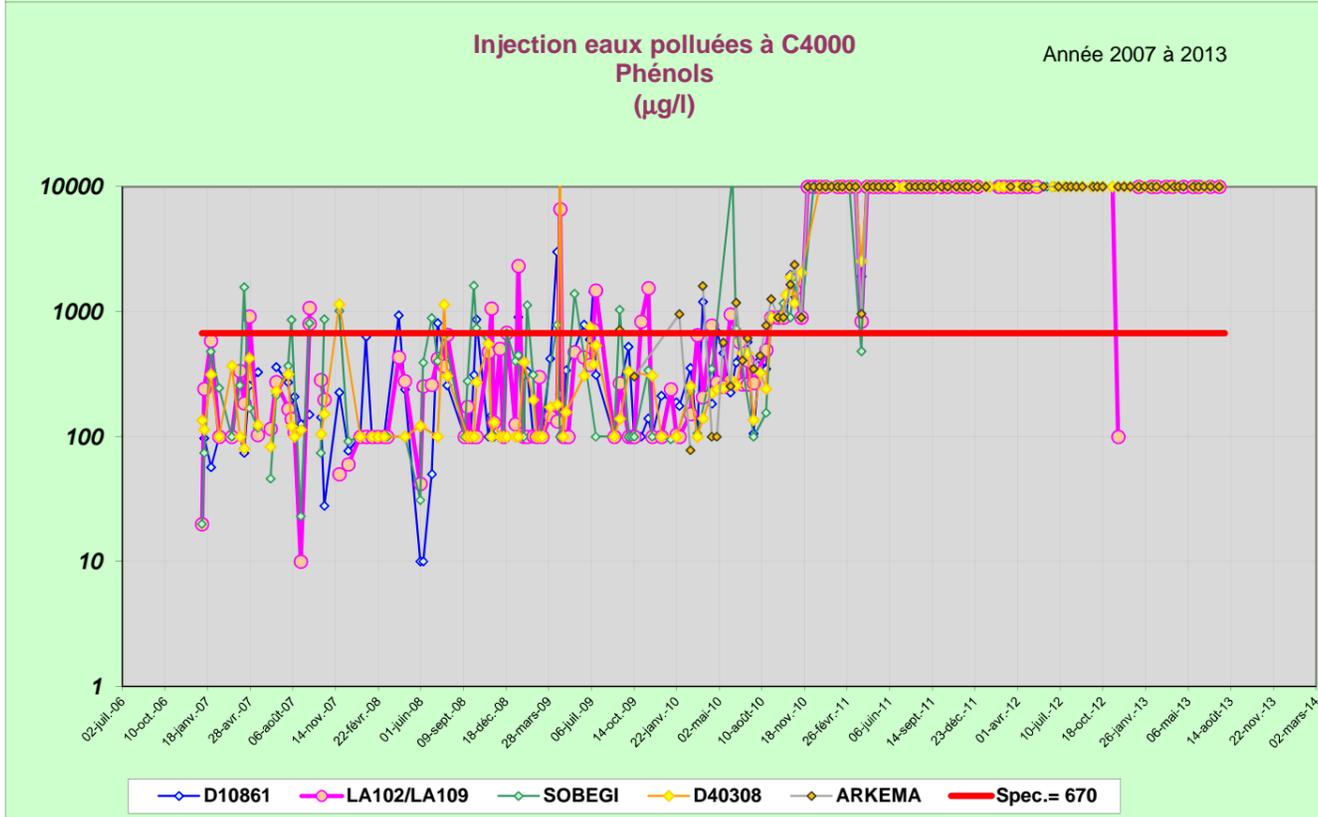
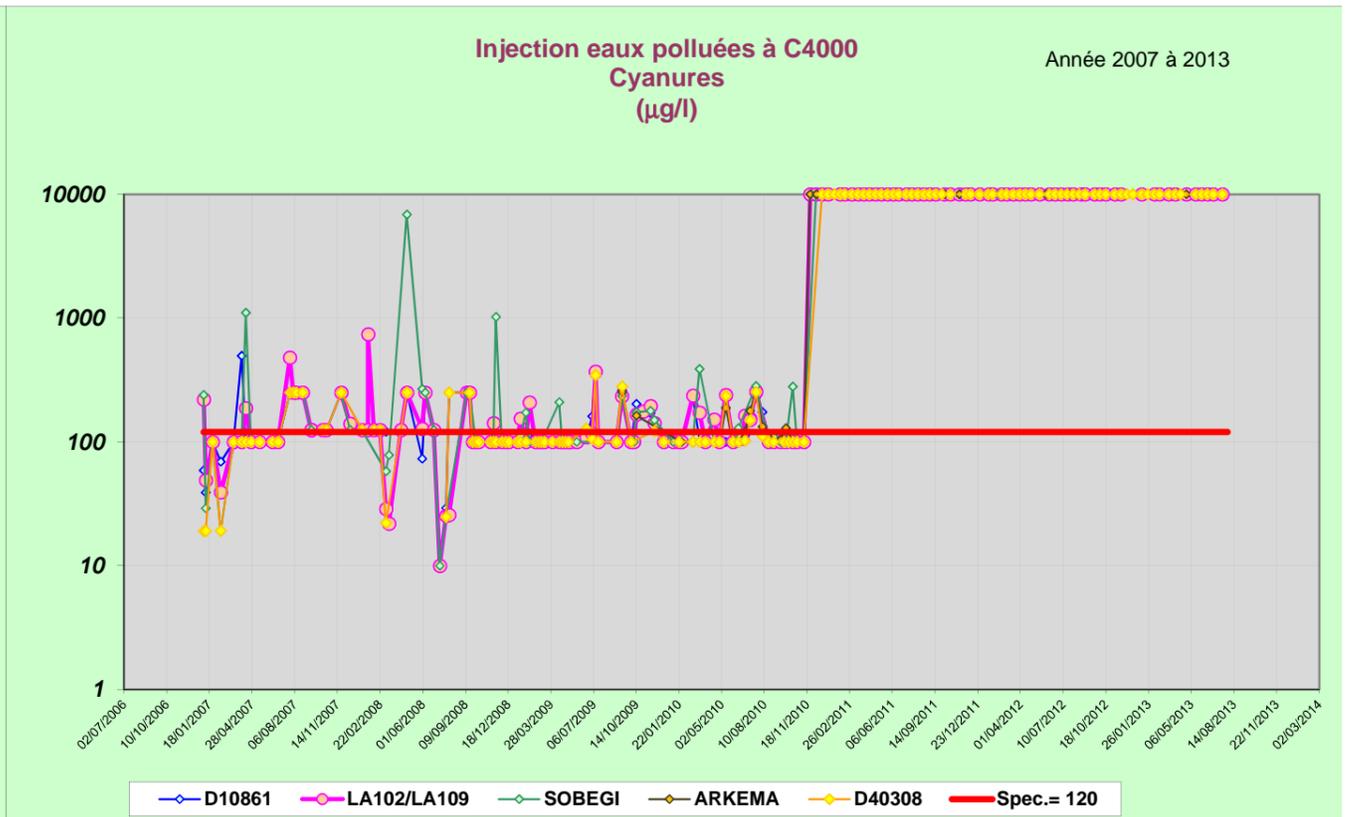
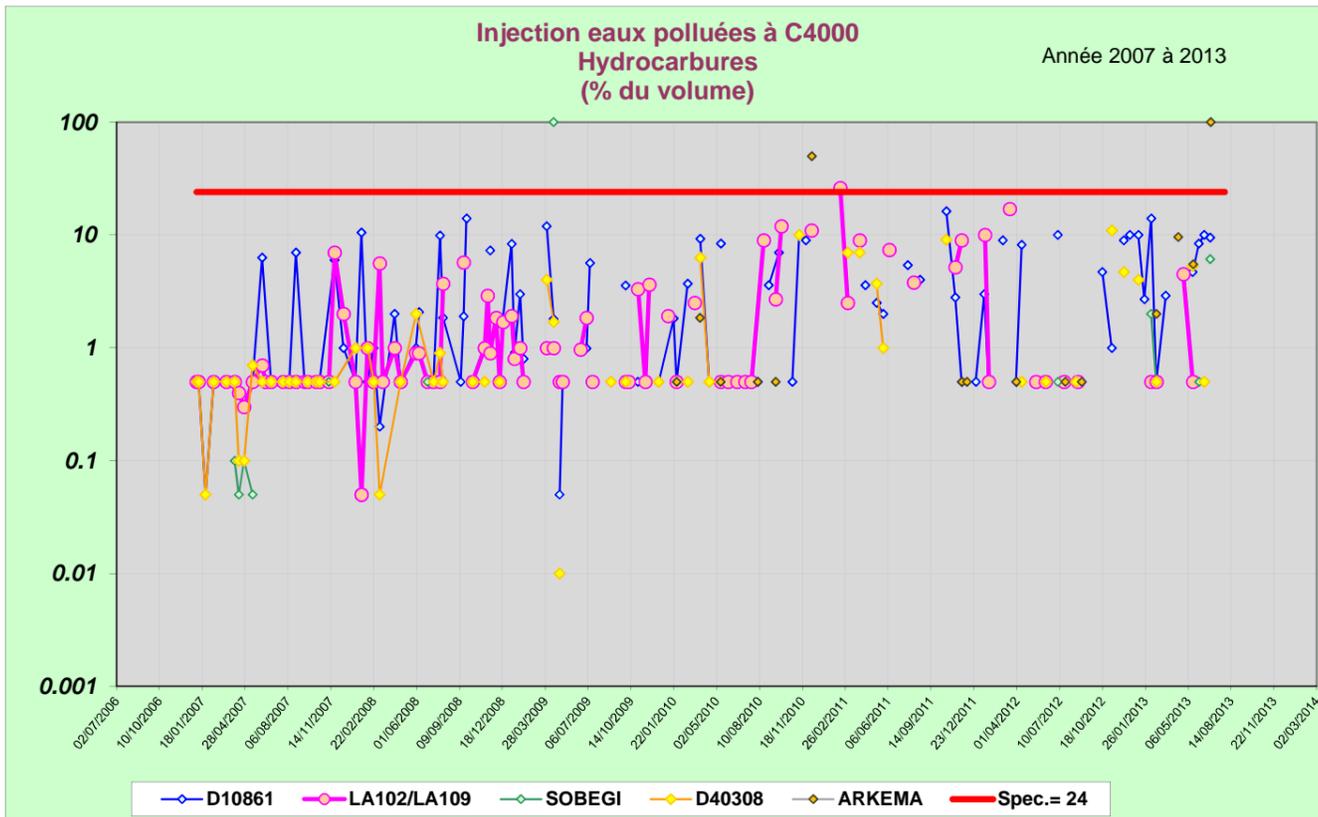
388052_V2 - Page 2 sur 2

ANNEXE 2

RÉSULTATS DU SUIVI ANALYTIQUE SUR LES EAUX INJECTÉES DANS LE C 4000

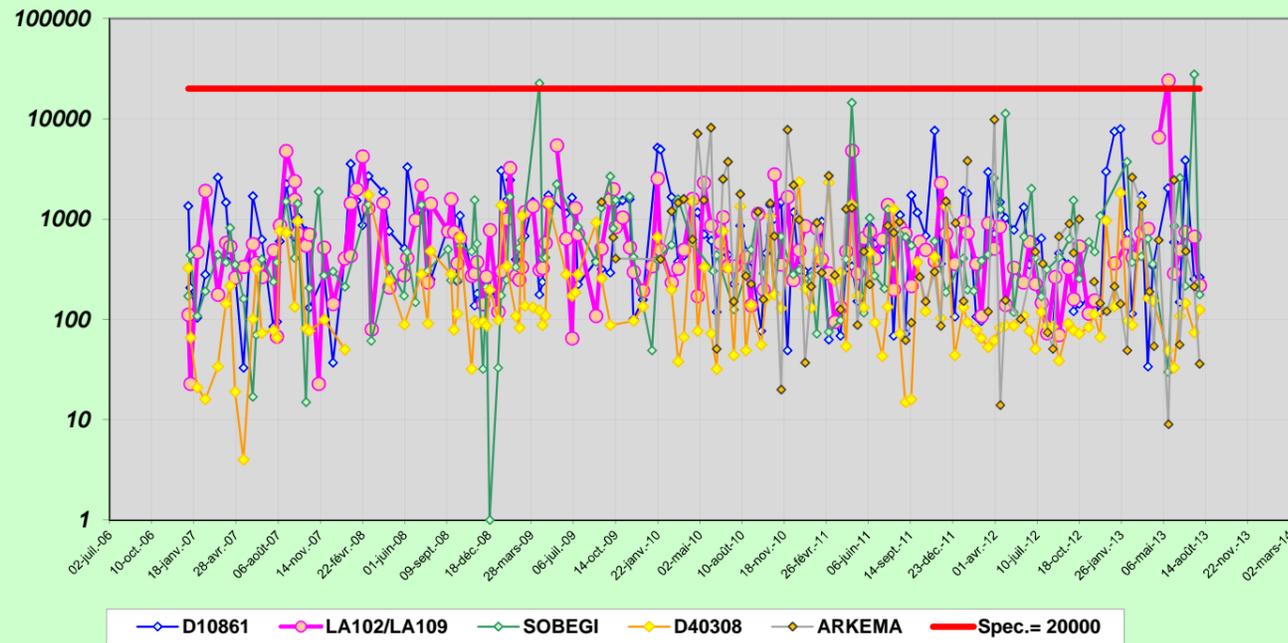






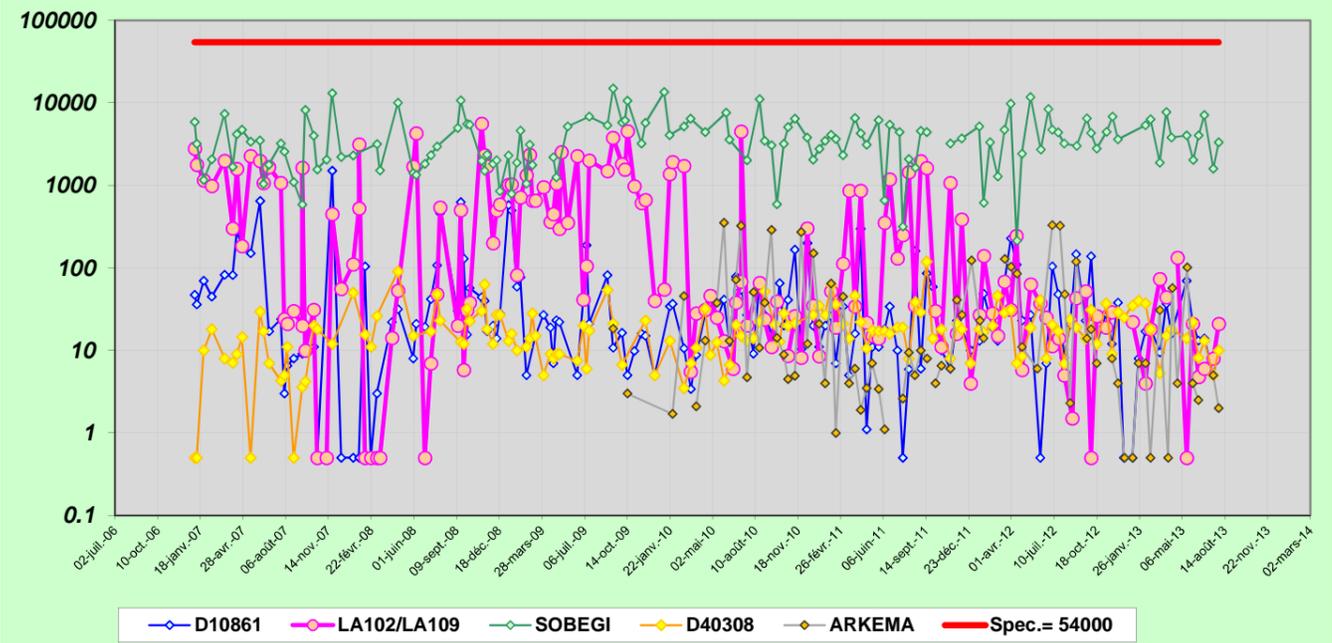
Injection eaux polluées à C4000
R-SH
(mg/l)

Année 2007 à 2013



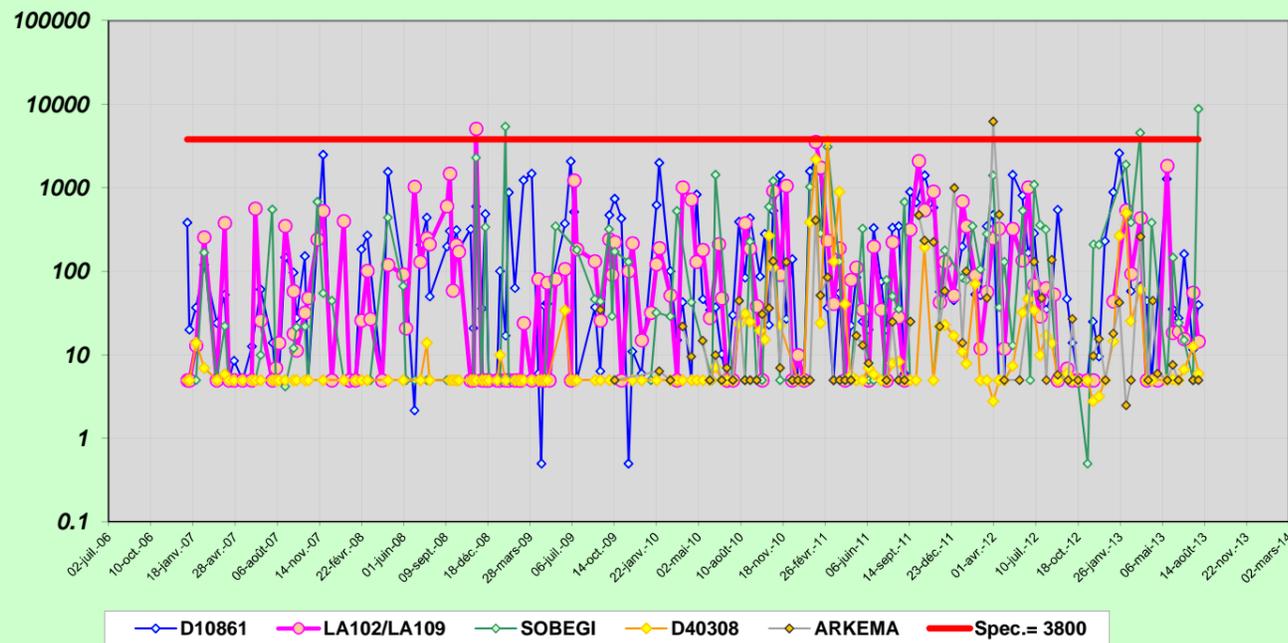
Injection eaux polluées à C4000
Sulfates
(mg/l)

Année 2007 à 2013



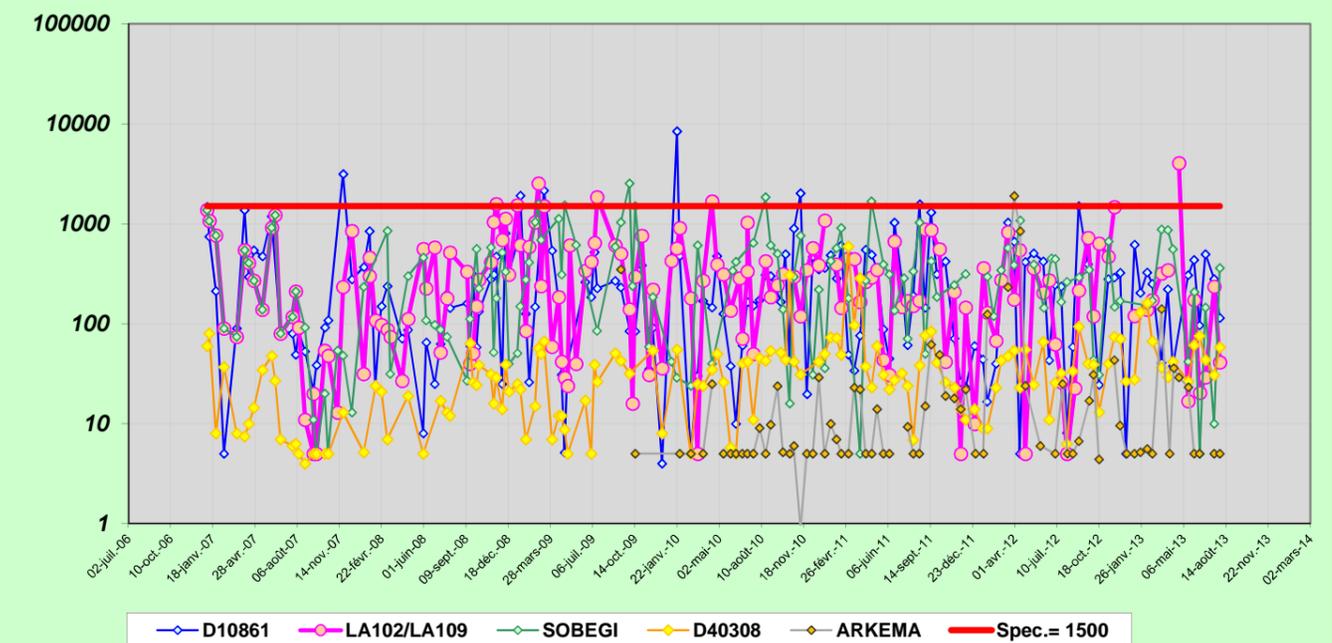
Injection eaux polluées à C4000
Sulfites
(mg/l)

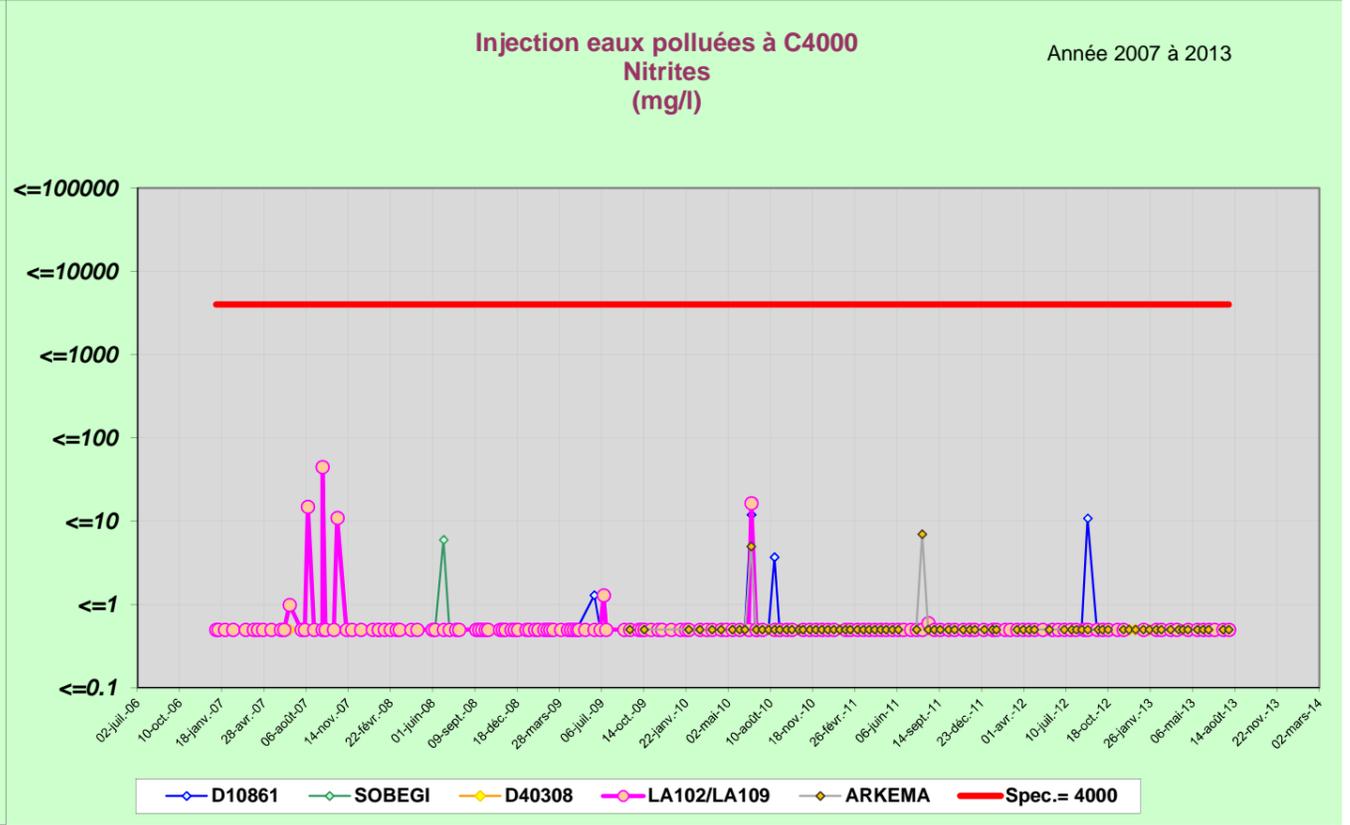
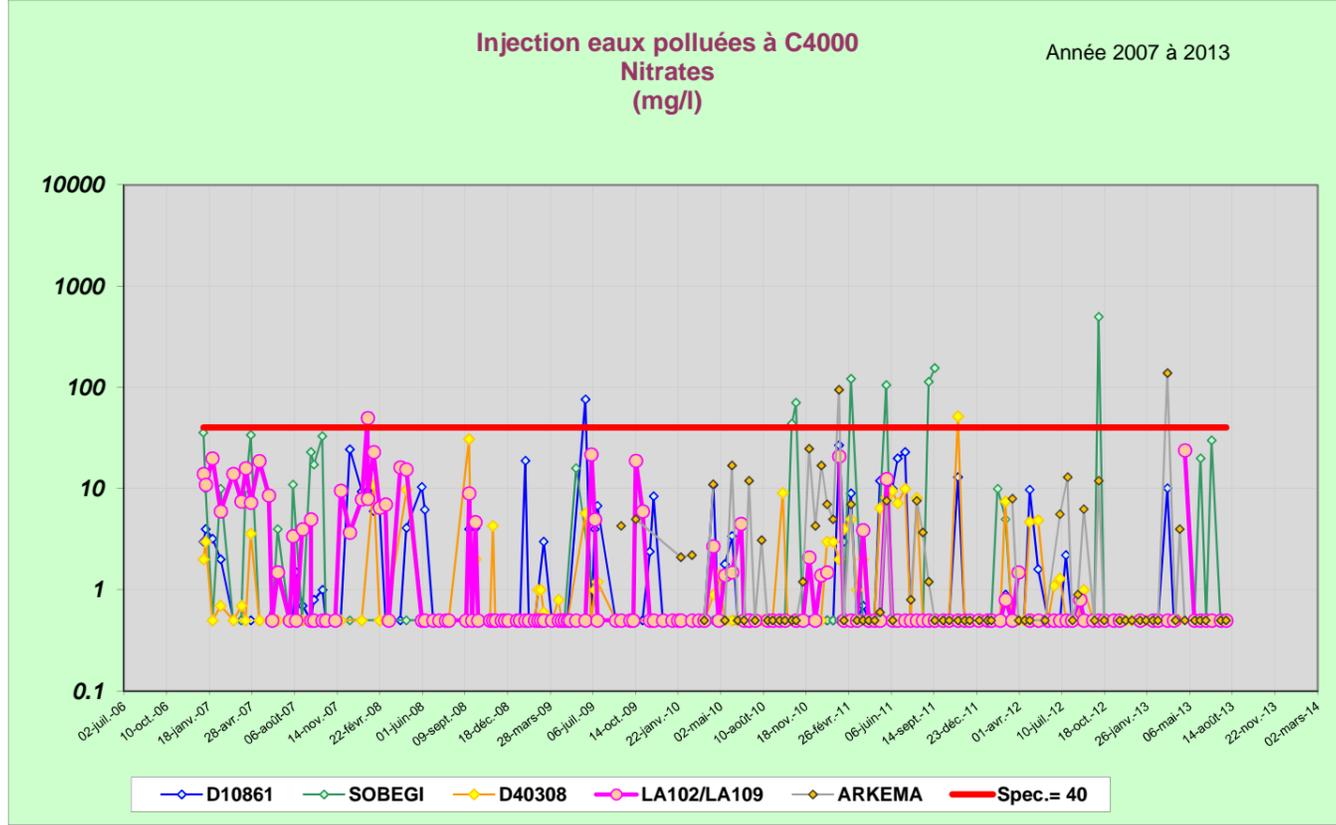
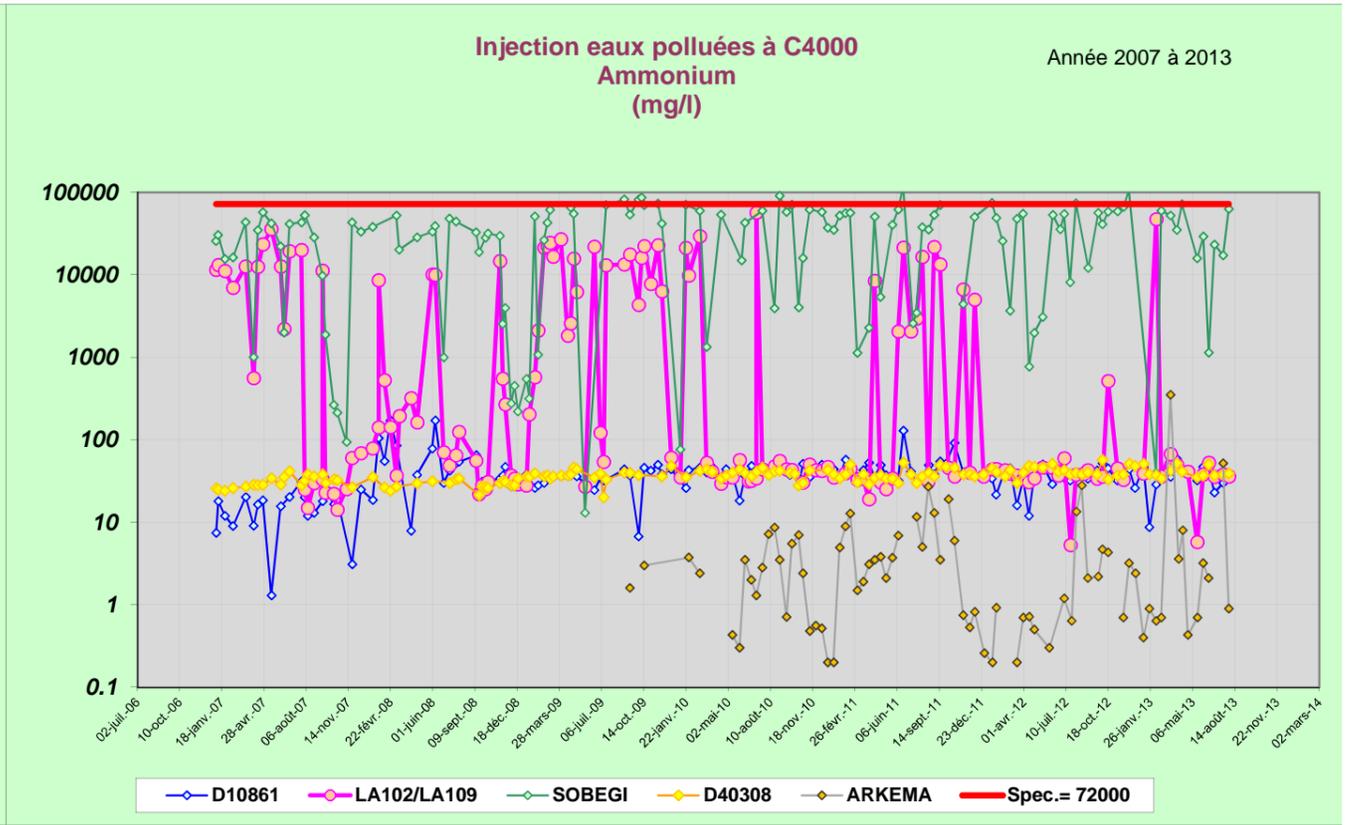
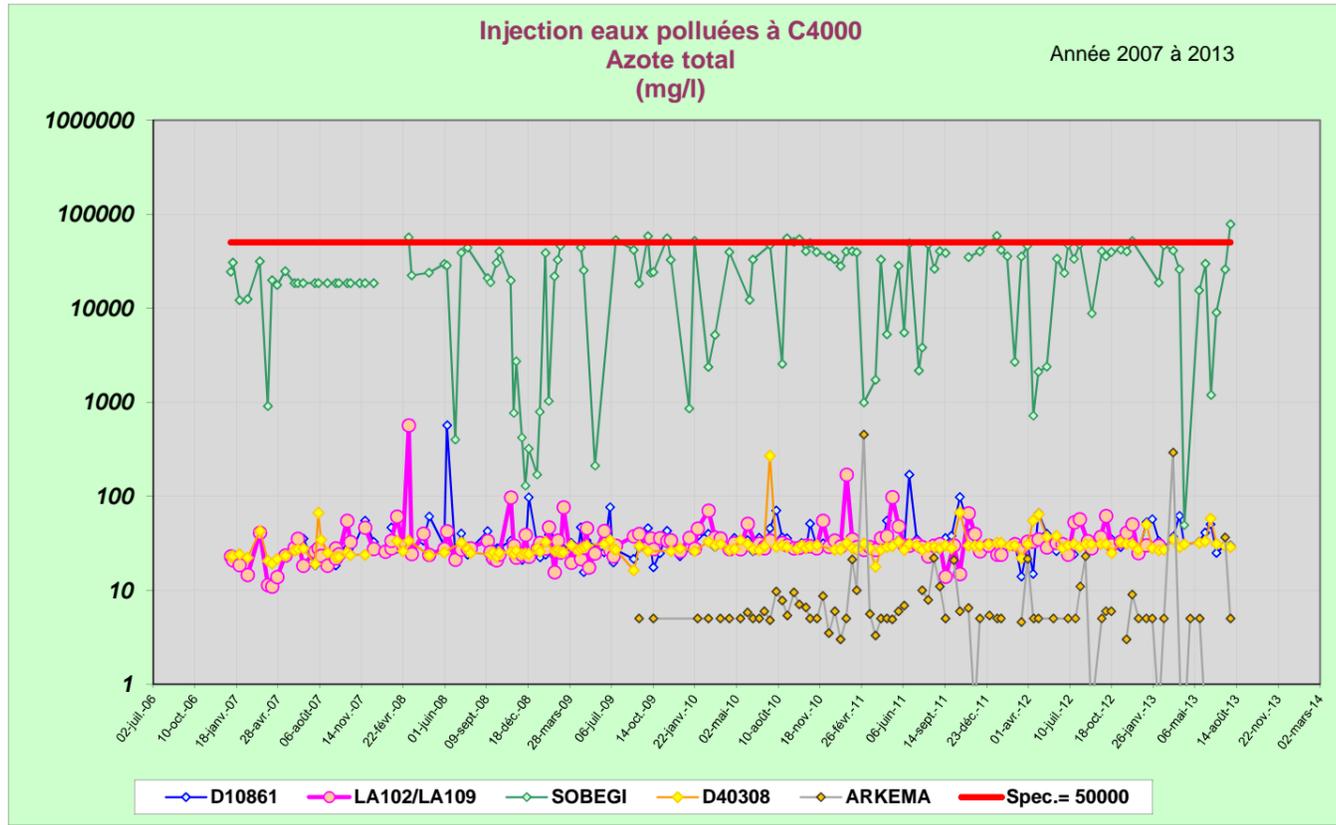
Année 2007 à 2013



Injection eaux polluées à C4000
Thiosulfates
(mg/l)

Année 2007 à 2013





ANNEXE 3

RAPPORT DE SYNTHÈSE SURVEILLANCE SISMIQUE SOCIÉTÉ MAGNITUDE

**TOTAL EXPLORATION
PRODUCTION FRANCE**

LACQ – PUIITS LA 405

**SURVEILLANCE SISMIQUE
SYNTHESE 2007 - 2012**

MAG/13/0566

HISTORIQUE DES RÉVISIONS

| Version | Date | Description |
|---------|------------|-----------------------|
| 1.0 | 18/06/2013 | Version initiale |
| 2.0 | 02/07/2013 | Version intermédiaire |
| 3.0 | 06/08/2013 | Version finale |

| Émis par | Approuvé par | Destinataires |
|------------|--------------|------------------------|
| E. Fortier | C. Maisons | V. Lepoivre X Payre |

HISTORIQUE CONTRACTUEL

| | | |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Proposition | Référence | MAG1302595 |
| | Version [Date] | 2 [17/05/2013] |
| | Item | 1 |
| Contrat | Référence | 4500097817 [10/01/2011] |
| Remarque | | |

Magnitude SAS

Centre Regain - Route de Marseille
04220 Sainte Tulle - FRANCE

Tel: +33 [0]492 794 120
Fax: +33 [0]492 794 121
seismic.monitoring@wanadoo.fr

www.magnitude-geo.com

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 5 |
| RESUME CONCLUSION | 6 |
| RESUME | 6 |
| CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS : | 7 |
| SYNTHESE 2007 À 2012 | 8 |
| ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU RÉSEAU | 16 |
| DESCRIPTION | 16 |
| <i>Capteurs sismiques – Sonde SAS (01/01/07 au 15/07/07)</i> | 16 |
| <i>Description l’antenne Multi-niveaux (antenne SQUID™)</i> | 17 |
| ANNEXE 2 : LA SISMICITÉ INTERNE | 20 |
| CARTES DE LOCALISATION DE LA SISMICITÉ INTERNE..... | 20 |
| <i>Coupe Y-Z de localisation des événements internes au périmètre de Lacq & Histogrammes des magnitudes calculées des événements</i> | 20 |
| <i>Plan X-Y de localisations des événements internes au périmètre de Lacq</i> | 24 |
| <i>Ensemble de la sismicité localisée de 2007 à 2012</i> | 27 |
| <i>Carte de localisation des événements corrélés avec les bases de données sismologiques nationales (ReNaSS)</i> | 29 |
| <i>Evolution de la magnitude en fonction de la distance au capteur de fond des événements sismiques internes localisés à Lacq de 2007 à 2012</i> | 31 |
| CONCLUSION : | 31 |
| MODÈLE DE VITESSE UTILISÉ POUR LA LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS DE LACQ..... | 32 |
| CARTES D’INCERTITUDE DE LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS..... | 32 |
| EXEMPLES D’ÉVÉNEMENTS INTERNES..... | 34 |
| <i>Exemple d’un événement de Mw = 2.4. (Corrélé avec les bases de données du ReNaSS) détecté par l’antenne SQUID™</i> | 34 |
| <i>Exemple d’un événement détecté par l’antenne SQUID™ et localisé à 1746m de profondeur</i> | 35 |
| <i>Exemple d’un événement de Mw = 1.1 détecté par la sonde SAS</i> | 36 |
| <i>Exemple d’un événement de Mw = -1.3 détecté par la sonde SAS</i> | 37 |
| ANNEXE 3 : SISMICITE EXTERNE DETECTEE PAR LE RESEAU DE LACQ | 38 |
| ANNEXE 4 : NIVEAUX DE BRUIT | 41 |
| ÉVOLUTION DU BRUIT DE FOND..... | 41 |
| <i>Evolution du niveau de bruit de 2007 à 2012 à partir des sondes à -560 m (TVD) (voie Z) en détection</i> : | 41 |
| <i>Evolution du niveau de bruit à partir des différents niveaux de l’antenne de décembre 2007 à 2012</i> : | 42 |
| ANNEXE 5 : PARAMÈTRES DE DETECTION | 44 |
| <i>Système d’acquisition Seisnum (2007)</i> : | 44 |
| <i>Système d’acquisition Kephren (2007 - 2012)</i> : | 44 |
| <i>Comparatif des seuils de détection entre les deux systèmes</i> : | 44 |
| ANNEXE 6 : LES CARTES DE SENSIBILITÉ DE DÉTECTION | 45 |
| DÉFINITION..... | 45 |
| CARTES DE SENSIBILITÉ THÉORIQUE DE DÉTECTION..... | 46 |
| ANNEXE 7 : BILAN DU FONCTIONNEMENT | 48 |

| | |
|---|-----------|
| LES INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT..... | 48 |
| SUIVI DE FONCTIONNEMENT | 49 |
| ANNEXE 8 : CALCUL DE LA MAGNITUDE..... | 51 |
| ANNEXE 9: PROCEDURE DE SUIVI – ANTENNE SQUID™..... | 52 |
| PC OMNI..... | 52 |
| SYNOPTIQUE GÉNÉRAL DE LA CHAINE DE TRAITEMENT DES DONNÉES MICROSISMIQUES DE LACQ | |
| | 53 |
| <i>Phase 1 : Interrogation toutes les 60s de la station.</i> | 53 |
| <i>Phase 2 : Récupération de toutes les nouvelles informations de détection contenues dans les fichiers trigger_station.off de la station.</i> | 53 |
| <i>Phase 3 : Création d'un fichier trigger.synth</i> | 53 |
| <i>Phase 4 : Envoi d'une requête à la station.....</i> | 54 |
| <i>Phase 5 : Rapatriement des fichiers sismiques en format titan</i> | 54 |
| <i>Phase 6 : Gestion des données.....</i> | 54 |
| TRAITEMENT DES DONNÉES | 55 |
| ANNEXE 10 : SYNOPTIQUE DU RESEAU POUR LE SITE DE LACQ | 56 |
| SYNOPTIQUE D'INSTALLATION POUR LA SONDE SAS | 56 |
| SYNOPTIQUE DE L'INSTALLATION DANS L'ARMOIRE SISMIQUE POUR L'ANTENNE DE FOND SQUID™ | |
| INSTALLÉE EN DÉCEMBRE 2007..... | 57 |

INTRODUCTION

Ce rapport est établi à la demande et pour le compte de la société Total Exploration Production France, dans le cadre de la proposition MAG1302595 concernant la réalisation d'un rapport de synthèse de suivi sismique de 2007 à 2012, complémentaire aux prestations annuelles de surveillance réalisées sur le site de Lacq (64).

Cette synthèse de 2007 à 2012 du réseau de surveillance sismique de Lacq a pour objectif de réaliser un bilan de la sismicité interne au site de Lacq et du fonctionnement du système d'acquisition. Il sera présenté de la manière suivante :

- Un résumé sous forme de fiche synthétique, comprenant :
 - La description du réseau.
 - Les paramètres d'acquisition.
 - Bilan de la sismicité interne.
 - Bilan de la sismicité externe.
 - Niveaux de bruit.
 - Sensibilité de détection théorique.
 - Sensibilité effective de localisation.
 - Bilan de fonctionnement du réseau.
 - La procédure de suivi d'exploitation.
 - Recommandations.
 - Synthèse des documents de référence.

Puis en annexe sera détaillée chaque partie présentée ci-dessus.

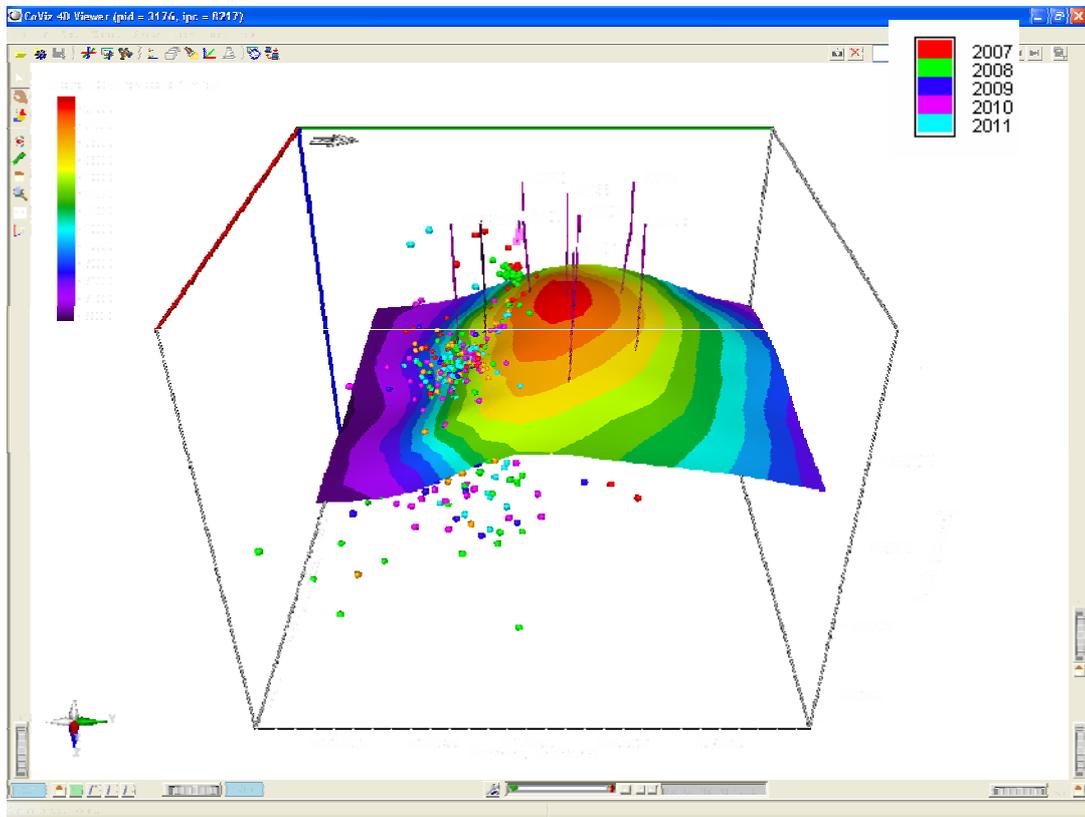


Figure 1 - Vue générale du toit du réservoir et de la sismicité localisée de 2007 à 2012..

RESUME CONCLUSION

RESUME

Le réseau d'écoute sismique de Lacq a été installé dès 2004 à la demande de TEPF dans le but de surveiller l'intégrité autour des points d'injection dans le C4000 jusqu'à des profondeurs supérieures à 6000m.

La période de surveillance microsismique du site de Lacq de 2007 à 2012, a fonctionné de manière très satisfaisante avec un taux de fonctionnement moyen de 99.2% (*taux calculé pendant la période où le site de Lacq a bénéficié d'outils d'écoute microsismique*).

Ces six dernières années ont été marquées principalement par deux faits majeurs :

- I. La perte de la sonde numérique SAS dans le puits LA405, en Juillet 2007. Un nouveau système d'acquisition, nouvelle génération, et une antenne multi-capteurs ont été installés en Décembre 2007.
Lors de l'installation de l'antenne, un défaut des sondes à -560m et -400m a été observé après ancrage. L'origine d'une dégradation du câble sismique par frottement contre le casing dans la partie inclinée du puits lors de la descente est toujours en question. Néanmoins, le système, toujours en service actuellement, permet la détection et la localisation de microséismes internes au réservoir de Lacq. Cette antenne quatre niveaux, est composée de deux arrangements géophones de type trièdre direct et galpérin, qui a été validée par TEPF dans le but d'une phase d'étude de recherche et développement.
- II. De Mars à octobre 2011, les localisations des événements microsismiques présentées dans les comptes rendus hebdomadaires sont fausses.
Un rapport correctif a été émis le 03 Octobre 2011, relocalisant tous les événements à partir de Mars 2011, et une vérification a été réalisée pour la période de Janvier à Mars 2011. Ce problème identifié, fait suite au remplacement d'un des serveurs internes à Magnitude occasionné par une panne en Février 2011. En effet, après renouvellement de ce dernier, une erreur s'est produite dans le paramétrage nécessaire à la localisation des événements internes au réservoir de Lacq. Par la suite, une procédure de Contrôle Qualité du traitement des données a été mise en place et envoyée à TEPF afin d'éviter de nouveau ces erreurs.

Sur 1329 événements internes enregistrés, 695 événements ont été localisés ; et 72 % des événements localisés le sont entre 3000 et 5000 m, dans le réservoir de Lacq.

Par ailleurs, malgré un changement d'outil et de système d'acquisition en 2007, la sensibilité théorique de détection et la sensibilité effective de localisation ont très peu évolué de 2007 à 2012. En effet, une seule composante (Axe Z) du capteur à -560 mètres, est en détection avec un niveau de bruit de fond constant. Du 16/12/2011 au 25/01/2012 cette voie était en défaut temporaire induisant des détections continues. Elle a été remplacée en détection par la voie X du capteur à -400m pendant cette période induisant une diminution de sensibilité de 3 dB.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS :

Le système de surveillance microsismique a fonctionné correctement durant la période de 2007 à 2012. Les systèmes d'analyse et les équipements ont sensiblement évolué dans le but d'améliorer le suivi et l'analyse de la sismicité induite du site de Lacq.

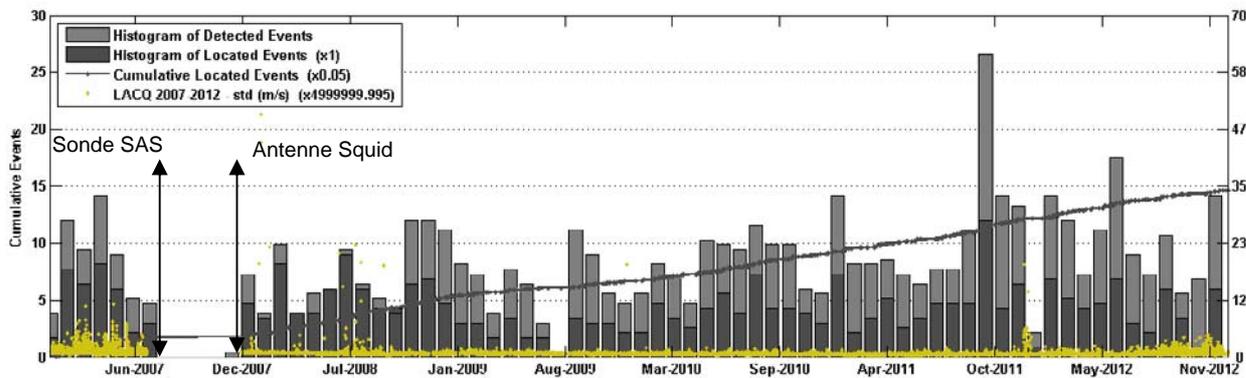
Le réseau de surveillance sismique de Lacq remplit donc ses objectifs : suivre la sismicité associée à l'injection dans C4000 (arrêté 02/IC/477).

SYNTHESE 2007 À 2012

| RESEAU | | |
|---|---|--|
| Ancien système d'acquisition du 01/01/07 au 15/07/07. | | |
| Dispositif 1 sonde SAS-2000 Type de capteurs 1 sonde SAS-2000 Arrangement : Trièdre direct. Système d'acquisition : Seisnum V4.41 Date de l'installation et mise en acquisition : Date de mise hors service : | Sonde numérique ancrée à -570 m (TVD/GL) dans le puits LA405. Géophones Geospace GS14-L9 – 28 Hz, sensibilité de 24 V/m/s. Bande passante capteur [14 -1200] Hz 1 géophone / composante. Gain : 60dB au fond Fréquence échantillonnage : 2400 pts.s ⁻¹ . Le 18/03/2004. Le 15/07/2007, cause rupture câble dans le puits. | <p style="color: red; font-weight: bold; margin: 0;">Se référer à Annexe 1 : Description (page 16) pour le descriptif complet du réseau d'écoute microsismique</p> |
| Réseau du 15/12/07 au 31/12/12. | | |
| Dispositif 1 antenne de 4 sondes SQUID™ Type de capteurs sondes SQUID™ Arrangement : Trièdre direct Galperin Système d'acquisition : Kephren Date de l'installation et mise en acquisition : Anomalies matériel : | Sondes analogiques ancrées à -300/-350/-400/-560 m dans le puits LA405. Géophones SENSOR SM45 – 15 Hz, sensibilité de 37 V/m/s. Bande passante capteur [10 -500] Hz 4 géophones en parallèle par composante. (SQUID™ 1 et 3 à -350 et -560m, TVD/GL) 2 géophones en parallèle par composante. (SQUID™ 4 & 2 à -300 et -400m, TVD/GL) Gain : 4 (134 nV/Count) Fréquence échantillonnage : 1000 pts.s ⁻¹ . Le 15/12/2007. 15/12/2007 : SQUID™ à -560m : Voies X et Y en dysfonctionnement 20/06/2011 : SQUID™ à -400m : Voies Z en défaut. 16/12/2011 : SQUID™ à -560m : Voie Z en défaut temporaire. | <p style="color: red; font-weight: bold; margin: 0;">Se référer à Annexe 1 : Description du réseau (page 16) pour le descriptif complet du réseau d'écoute microsismique</p> |

| PARAMETRES D'ACQUISITION | | |
|--|---|--|
| Ancien système d'acquisition du 01/01/07 au 15/07/07. | | |
| Paramètres Détections | Enregistrement par seuil détection | Se référer à Annexe 5 : Paramètres de détection (page 44) |
| Sonde SAS 2000 - Seisnum | Détection = 1 voie pour détecter (Voie Z) Seuil de détection = $1.66 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Gain = 60 (112 nV/count) Echantillonnage = 2400 pts.s ⁻¹ | |
| Système d'acquisition du 15/12/07 au 31/12/12. | | |
| Paramètres Détections | Enregistrement continu | Se référer à Annexe 5 : Paramètres de détection (page 44) |
| Antenne SQUID™ – Kephren | STA = 0.004 s LTA = 0.01 s STA/LTA = 3.5 ($1.56 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$) Gain = 4 (134 nV/count) Echantillonnage = 1000 pts.s ⁻¹ 1 voie en détection (Voie Z SQUID™ à -560m) sauf du 20/12/2011 au 25/01/2012 (voie X SQUID™ à -400m) | |

BILAN SISMICITE INTERNE



Nombre d'événements internes au site :

| | Nb d'événements : | | | Distribution selon la profondeur, avec indicateur des valeurs <i>Min</i> et <i>Max</i> des <i>Mw</i> | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------|-----------|----------------|--|--------------|---|--------------|----|-------------|----|--------------|----|--------------|----|--------------|
| | DéTECTÉS | LOCALISÉS | Mw [min / max] | Inf. à 2000 | 2000 à- 3000 | | 3000 à 4000 | | 4000 à 5000 | | 5000 à 6000 | | Sup à 6000 | | |
| 2007 | 130 | 84 (64%) | -1.5 / 1.1 | 8 | -0.4 -1.5 | 1 | 0.2 | 22 | 0.8 -1.3 | 51 | 1.1 -0.9 | 0 | | 2 | 0.4 0 |
| 2008 | 211 | 157 (74%) | -1.3 / 3.6 | 16 | -0.3 -1.3 | 6 | 0.1 -0.8 | 26 | 0.6 -0.7 | 62 | 2.1 -0.9 | 19 | 0.7 -0.5 | 28 | 3.6* -0.7 |
| 2009 | 179 | 80 (44%) | -0.7 / 2.6 | 0 | | 1 | -0.7 | 15 | 0.3 -0.6 | 41 | 1.1 -0.6 | 10 | 2.6* -0.5 | 13 | 2.3* -0.2 |
| 2010 | 233 | 118 (50%) | -0.8 / 2.4 | 1 | 2.4* | 9 | 0.2 -0.7 | 38 | 1.0 -0.7 | 43 | 1.0 -0.8 | 11 | 1.0 -0.6 | 16 | 2.4* -0.3 |
| 2011 | 302 | 138 (45%) | -0.9 / 3.1 | 3 | 0.2 -0.8 | 5 | -0.1 -0.9 | 47 | 1.0 -0.8 | 66 | 3.1* -0.8 | 4 | 0.0 -0.2 | 13 | 0.9 -0.4 |
| 2012 | 274 | 116 (42%) | -0.6 / 2.7 | 0 | | 5 | 0.6 -0.5 | 35 | 1.0 -0.6 | 51 | 2.7* -0.6 | 19 | 0.9 -0.2 | 6 | 0.5 -0.1 |

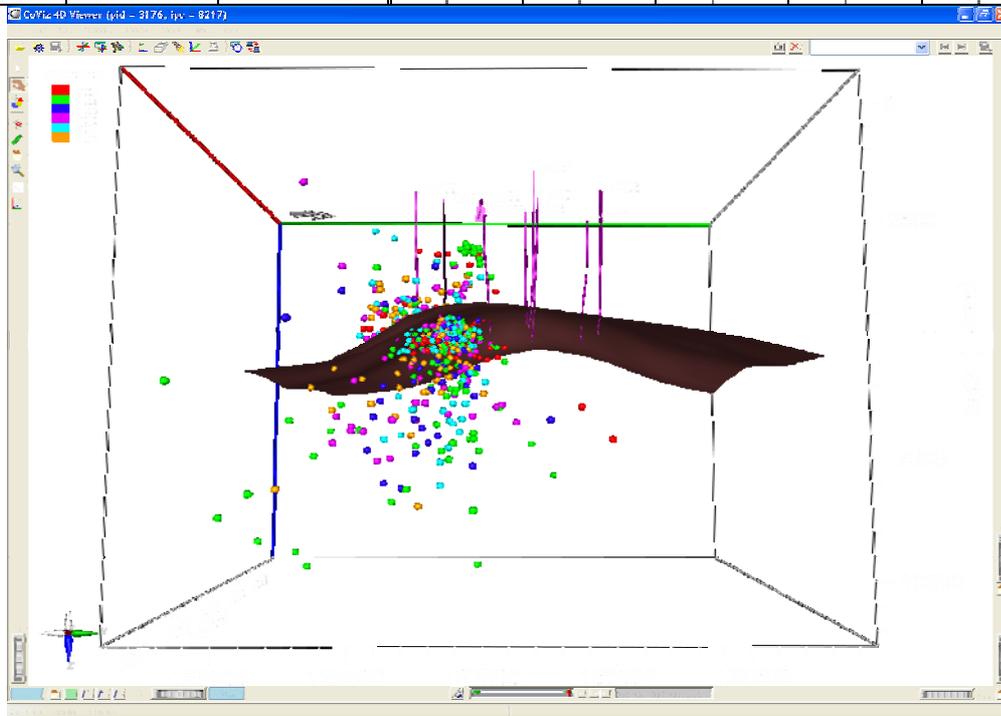


Figure 2: Événements localisés de 2007 à 2012.

Se référer à Annexe 2 : La sismicité Interne (page 20) pour une étude détaillée.

*Magnitude des événements corrélés avec les bases de données sismologiques nationales (Renass & CSEM)

BILAN SISMICITE EXTERNE

| | | |
|--|--|---|
| Historique de la sismicité régionale : | | Se référer à Annexe 3 : SISMICITE externe detectee par le reseau de lacq (page 38) |
| Sismicité externe enregistrée par le réseau de Lacq : | Nb d'événements : 22. | |
| Périmètre régional | 24 (Tous corrélés avec les bases sismologiques nationales) | |

NIVEAUX DE BRUIT

Niveaux de bruit de référence

- Valeurs* en 10^{-7} m.s^{-1} pour les sondes SAS (2007) et SQUID™ (2007-2012).
- Calculés par année sur la période du 01/01/2007 au 31/12/2012.

* Les valeurs utilisées pour l'étude sont calculées sur des fichiers (détections forcées, toutes les heures) et correspondent à l'écart type (ou déviation standard) de la distribution du bruit.

| | Voies | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | |
|----------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|--|
| Sonde SAS | Voie Z | 1.7 | | | | | | Se référer à Annexe 4 : Niveaux de bruit (page 41) pour une étude détaillée des niveaux de bruit HD : Hors détection car en défaut. ~ : Non calculé car trop de variation. |
| SQUID™ 4 (-300m) | M1_LOX/LAC.405.1X | 3.4 | 5.4 | 3.2 | 2.1 | 1.8 | 1.5 | |
| | M1_LOY/LAC.405.1Y | 3.4 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | |
| | M1_LOZ/LAC.405.1Z | 5.4 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | |
| SQUID™ 3 (-350 m) | M2_LOX/LAC.405.2X | 6.7 | 3.8 | 4.0 | 3.2 | 2.5 | 2.5 | |
| | M2_LOY/LAC.405.2Y | 2.0 | 1.6 | 2.1 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | |
| | M2_LOZ/LAC.405.2Z | 2.0 | 1.6 | 2.1 | 2.0 | 1.6 | 1.6 | |
| SQUID™ 2 (-400 m) | M3_LOX/LAC.405.3X | 5.4 | 6.2 | 4.8 | 2.4 | 1.5 | 1.5 | |
| | M3_LOY/LAC.405.3Y | 2.0 | ~ | ~ | 2.4 | HD | HD | |
| | M3_LOZ/LAC.405.3Z | 2.0 | ~ | 2.7 | 2.4 | 1.5 | HD | |
| SQUID™ 1 (-560 m) | M4_LOX/LAC.405.4X | HD | HD | HD | HD | HD | HD | |
| | M4_LOY/LAC.405.4Y | HD | HD | HD | HD | HD | HD | |
| | M4_LOZ/LAC.405.4Z | 1.6 | 1.5 | 1.5 | 1.33 | 1.0 | 1.0 | |

Sensibilité Théorique de détection du réseau

Valeurs de référence :

- Données en équivalent magnitude de détection.
- Calculées à partir de seuils de détection définis à partir des niveaux de bruit définis ci-dessus

| Zones cibles | Sonde SAS à -570 m | Sonde SQUID™ n°1 à -560m. | | | |
|---------------|--------------------|---------------------------|-----------|---------------------|--|
| | | 2007 | 2011-2012 | Fin 2011-début 2012 | |
| Inf. à 2000m | -1.7 | -1.8 | -1.9 | -1.7 | Se référer à Annexe 6 : Les cartes de sensibilité de détection (page 45) |
| 2000 à 3000 m | -1.4 | -1.6 | -1.7 | -1.5 | |
| 3000 à 4000 m | -1.3 | -1.4 | -1.5 | -1.3 | |
| 4000 à 5000 m | -1.2 | -1.3 | -1.4 | -1.2 | |
| 5000 à 6000 m | -1.1 | -1.2 | -1.3 | -1.1 | |
| Sup à 6000 m | -1.0 | -1.1 | -1.2 | -1.0 | |

Sensibilité effective de localisation des événements.

Valeurs de référence :

- Données en magnitude de Moment (Mw).
- Déterminées à partir des magnitudes de Moment des événements localisés en fonction de la distance source / capteur du fond à -560m.

| Distances Sources-Capteurs | Mw | | |
|----------------------------|------------------------------|--|---|
| | Sondes -560 m 2007 - 2011 | | |
| 1000 m | -1.5 | | <i>Se référer à Annexe 2 : La sismicité Interne (page 31)</i> |
| 2000 m | -1.3 | | |
| 3000 m | -1.0 | | |
| 4000 m | -0.8 | | |
| 5000 m | -0.6 / -0.7 | | |
| 6000 m | -0.6 | | |
| | | | |

Bilan du fonctionnement de l'auscultation micro sismique 2007 -2011

Indicateurs de fonctionnement :

- Réseau** : Nb de voies utilisées / Nb de voies possibles.
- Auscultation** : Temps de fonctionnement du système d'acquisition avec au moins un capteur tri-axe / temps total.
- Sensibilité** : La variation est calculée sur la voie la plus sensible (Voie Z du capteur à -560 m)
Variation = 20 log (max bruit voie Z / niveau de référence année n-1).

| | Réseau | Auscultation | Sensibilité | |
|---|--|--|--|--|
| 2007 | Indéterminée. Détérioration en cours d'année | Dégradée : 97.8% (sauf période du 15/07 au 15/12/07) | Inchangée | <i>Se référer à Annexe 7 : Bilan du fonctionnement (page 48)</i> |
| 2008 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 | Nominale : 100% | Inchangée | |
| 2009 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 | Dégradée : 98.4% (moyenne sur l'année) | Inchangée | |
| 2010 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 | Dégradée : 99.4% (moyenne sur l'année) | Inchangée | |
| 2011 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12. 75% du 12/06/11 au 20/12/11 66% depuis le 20/12/11 | Nominale : 100% | Améliorée : variation de +2.5 dB Dégradée -3.5 dB depuis le 20/12 | |
| 2012 | Dégradée : 66% du 01/01 au 25/01 75% depuis le 25/01 : 9 voies validées /12 | Dégradée : 98.7% (moyenne sur l'année) | Dégradée -3.5 dB jusqu'au 25/01 Inchangée : pas de variation par rapport à 2011 | |
| Bilan de la durée des outils d'écoute micro sismique : Durée d'écoute avec la sonde SAS : 39 mois. Durée d'écoute avec l'antenne SQUID™ : 58 mois. | | | | |

| Procédure de suivi d'exploitation | | | |
|--|--|---|------------------------------------|
| Items | Délivrables | Déclenchement | Délai |
| Analyse <i>dans le cadre de la commande TEPF 4500097817</i> | | | |
| Contrôle Fonctionnement du système | Contrôle quotidien (jour ouvré) du bon fonctionnement du système. | | |
| Analyse de la sismicité | Revue quotidienne des événements micro sismiques (jour ouvré) CR ----- Hebdomadaire | | |
| Bilan de la sismicité | Bilan annuel | Fin année calendaire N | Au 31/01 de l'année N+1 |
| Analyses événementielles | CR Événementiel (sur demande, hors contrat) | | |
| Maintenance <i>dans le cadre des commandes TEPF 4500097817</i> | | | |
| Maintenance annuelle | CR de maintenance | Retour de visite | 3 jours ouvrés |
| Dysfonctionnement matériel | CR anomalie | Perte de sensibilité et/ou dysfonctionnement | 24 heures ouvrées |
| Mise à disposition des données <i>dans le cadre de la commande TEPF 4500097817</i> | | | |
| Données sismiques | Sur DVD dès émission (et /ou) validation du rapport de synthèse annuel. | | |
| Suivi | Mise en ligne sur internet <ul style="list-style-type: none"> • Site internet dédié et sécurisé au suivi micro sismique (analyse) | | |

 CR : *Compte-Rendu*

| Synthèse des documents de référence | | | |
|-------------------------------------|--|---|---|
| Historique : | Type de documents | Sujets & auteurs | |
| <u>2007</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport 2004-2006 : <i>Mag/07/004</i> - CR anomalie Juillet 2007 <i>Mag/07/762</i> - Rapport Installation : <i>Mag/08/075</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse de la surveillance microsismique. <i>Par T. Bardainne</i> - Sonde SAS Hors service. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport d'installation de l'antenne dans le puits LA405. <i>Par E. Bourtembourg</i> | |
| <u>2008</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse annuelle 2007 : <i>Mag/08/043</i> - Synthèse 2007 spécifique <i>Mag/08/143</i> - CR de surveillance DRiRE <i>Mag/08/616</i> - CR Maintenance. <i>Mag/08792.</i> - Présentation Nov. 2008 à Pau. | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport annuel 2007. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport annuel spécifique C4000 <i>Par E. Nayman</i> - Rapport spécifique pour la DRiRE. <i>Par E. Nayman</i> - CR maintenance annuelle. <i>Par G. Régis</i> - Présentation synthèse 2004-2008. <i>Par T. Bardainne.</i> | |
| <u>2009</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse annuelle 2008. <i>Mag/09/0005</i> - Synthèse 2008 DRiRE. <i>Mag/09/0105</i> - CR Maintenance. <i>Mag/09/853</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport annuel 2008. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport spécifique pour la DRiRE <i>Par E. Nayman</i> - CR maintenance annuelle. <i>G Régis & E Bourtembourg</i> | |
| <u>2010</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse annuelle 2009. <i>Mag/10/002.</i> - CR Maintenance. <i>Mag/10/486</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport annuel 2009. <i>Par E. Nayman</i> - Changement alimentation 220V contre parasitage 50Hz. <i>G. Régis</i> | Tous les rapports ont été édités et envoyés à TEPF. |
| <u>2011</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse annuelle 2010. <i>Mag/11/076</i> - Synthèse 2010 spécifique <i>Mag/11/131</i> - CR Maintenance. <i>Mag/11/558</i> - Mémo anomalie matériel. <i>Mag/11/563</i> - CR exceptionnel Octobre <i>Mag/11/868</i> - CR anomalie 03 Octobre. <i>Mag/11/858</i> - Procédure Contrôle Qualité <i>Mag/11/879</i> - CR anomalie matériel <i>Mag/11/1254</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport annuel 2010. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport annuel spécifique C4000. <i>Par E. Nayman</i> - CR maintenance annuelle. <i>Par G. Régis</i> - Rapport sur fonctionnement voie Z de la SQUID™ 3. <i>Par E. Fortier</i> - CR suivi exceptionnel suite à un séisme de Mw = 3.1 <i>Par E. Nayman</i> - Relocalisation des événements de Janvier à Octobre. <i>Par E. Nayman</i> - Suivi et traitement des données. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport sur fonctionnement voie Z de la SQUID™ 4 <i>Par E. Nayman</i> | |
| <u>2012</u> | <ul style="list-style-type: none"> - Synthèse annuelle 2011. <i>Mag/12/0119</i> - Synthèse 2011 spécifique <i>Mag/12/0767</i> - Synthèse 2007-2011 <i>Mag/12/0947</i> - CR Maintenance. <i>Mag/12/0735</i> - Mémo anomalie matériel. <i>Mag/12/0861</i> - Procédure matériel. <i>Mag/12/0924</i> | <ul style="list-style-type: none"> - Rapport annuel 2011. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport annuel spécifique C4000. <i>Par E. Nayman</i> - Rapport quinquennal 2007-2011. <i>Par E. Bourtembourg/E. Nayman</i> - CR maintenance annuelle. <i>Par G. Régis</i> - Défaut station Kephren. <i>Par G. Régis</i> - Remplacement disque Flash. <i>Par G. Régis</i> | |

ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU RÉSEAU

DESCRIPTION

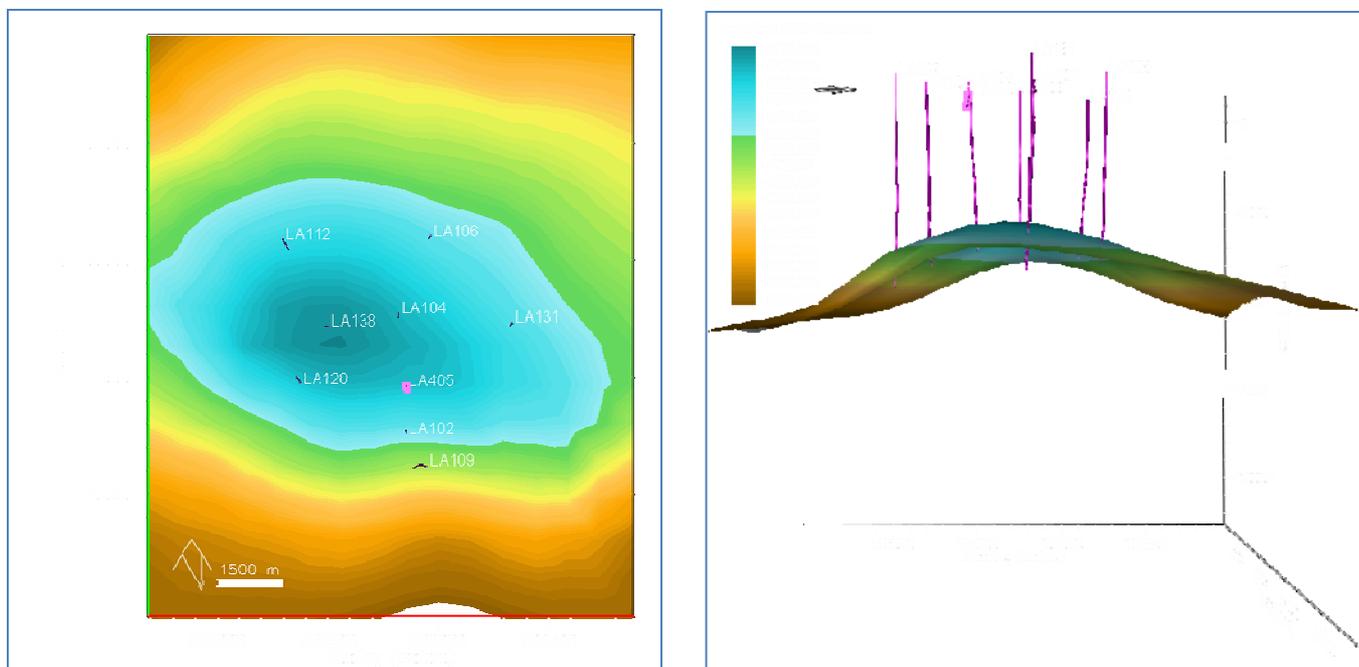


Figure 3 : Cartes représentant les puits, dont le LA405, et le toit du réservoir.

Capteurs sismiques – Sonde SAS (01/01/07 au 15/07/07)

Le système d'acquisition sismique a été installé le 16/03/2004 sur le site de Lacq. Une sonde SAS numérique (gain au fond) constituée d'un capteur à 3 composantes a été déployée dans le puits LA405 à une profondeur de 570 m MD¹ pendant 36 mois. A cette profondeur, le puits est incliné de 18.1° par rapport à la verticale, dans une direction N224.4°W (Figure 4).

Tableau 1 : Coordonnées & Orientation du capteur tri-axe.

| Coordonnées | X (m Lambert III) | Y (m Lambert III) | Z (m) TVD ² |
|-------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
| | 359319.3 | 127230.6 | 559.5 |
| Orientation | Composante | Azimut (°) | Inclinaison (° U to D ³) |
| | H1 | N123.4°W | 93.6° |
| | H2 | N213.3°W | 72.2° |

Le capteur est relié à une BASE en surface (alimentation électrique sonde), puis au niveau du PC à une carte d'acquisition MICS. Le logiciel d'acquisition est Seisnum V4.41.

¹ MD = Measured Depth = profondeur mesurée le long du puits.

² TVD = True Vertical Depth = profondeur réelle verticale.

³ U to D = Up to Down = par rapport à la verticale, vers le bas.

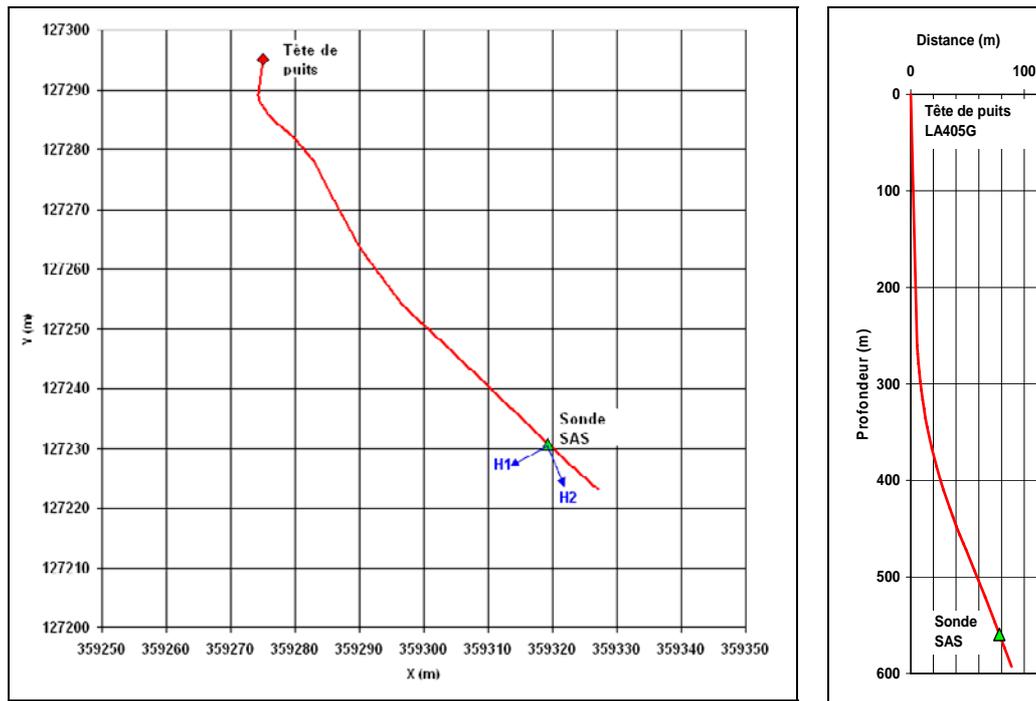


Figure 4 : Déviation du puits LA 405G : dans le plan horizontal (gauche) et dans le plan vertical (droite).

Système et paramètre d'acquisition de la sonde SAS

| | | |
|-------------|-----------------------------|--|
| Acquisition | Gain | 60dB (<i>fond</i>) ou coeff. de numérisation (112nV/count) |
| | Fréquence d'échantillonnage | 2400 pts/s |
| | Fréquence naturelle | 28 Hz |
| | Sensibilité | 24 V/m/s |

- **Logiciel d'acquisition :**
 - Seisnum® version 4.41, sous Windows 2000 Professionnel®
- **Logiciel de télé-intervention :** Pc-Anywhere

Description l'antenne Multi-niveaux (antenne SQUID™)

L'antenne d'écoute passive multi-niveaux a été installée du 10/12 au 15/12/2007, en remplacement de la sonde SAS à arbalète mise en place dans le cadre de la phase pilote. L'antenne de fond déployée dans le puits LA-405, entre 560 m et 300 m de profondeur (NGF¹), est composée d'un ensemble SQUID™ avec différents arrangements par niveaux, (Galpérin ou trièdre direct) et équipés de géophones (doublés ou quadruplés en parallèle selon l'arrangement) de haute sensibilité (37 V/m/s) et de fréquence propre 15 Hz.

¹ NGF : Nivellement Général de France

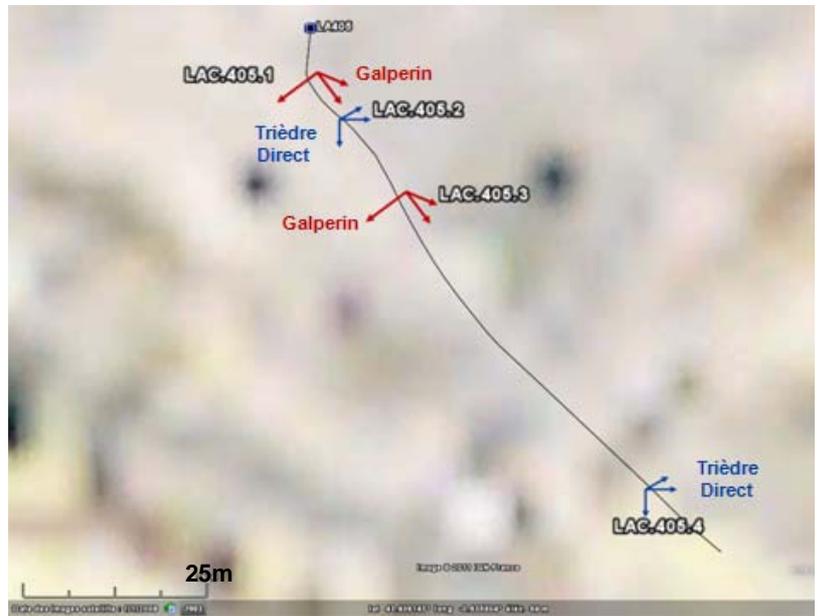
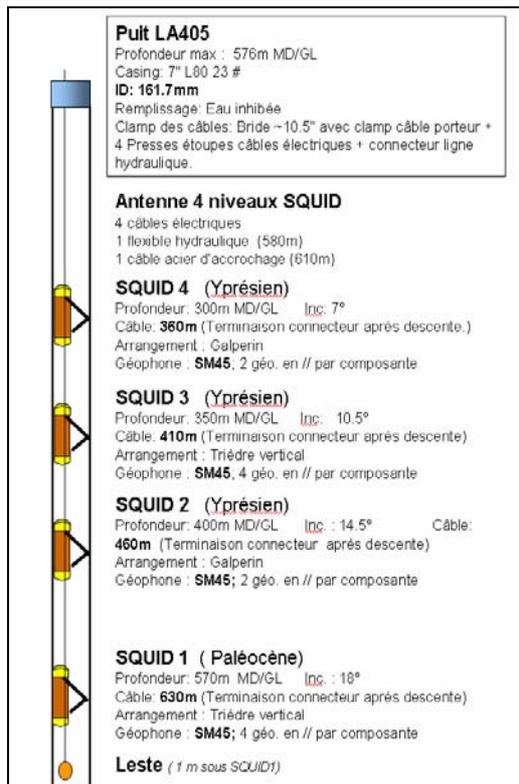


Figure 5 - Configuration générale de l'antenne Multi-niveaux SQUID™.

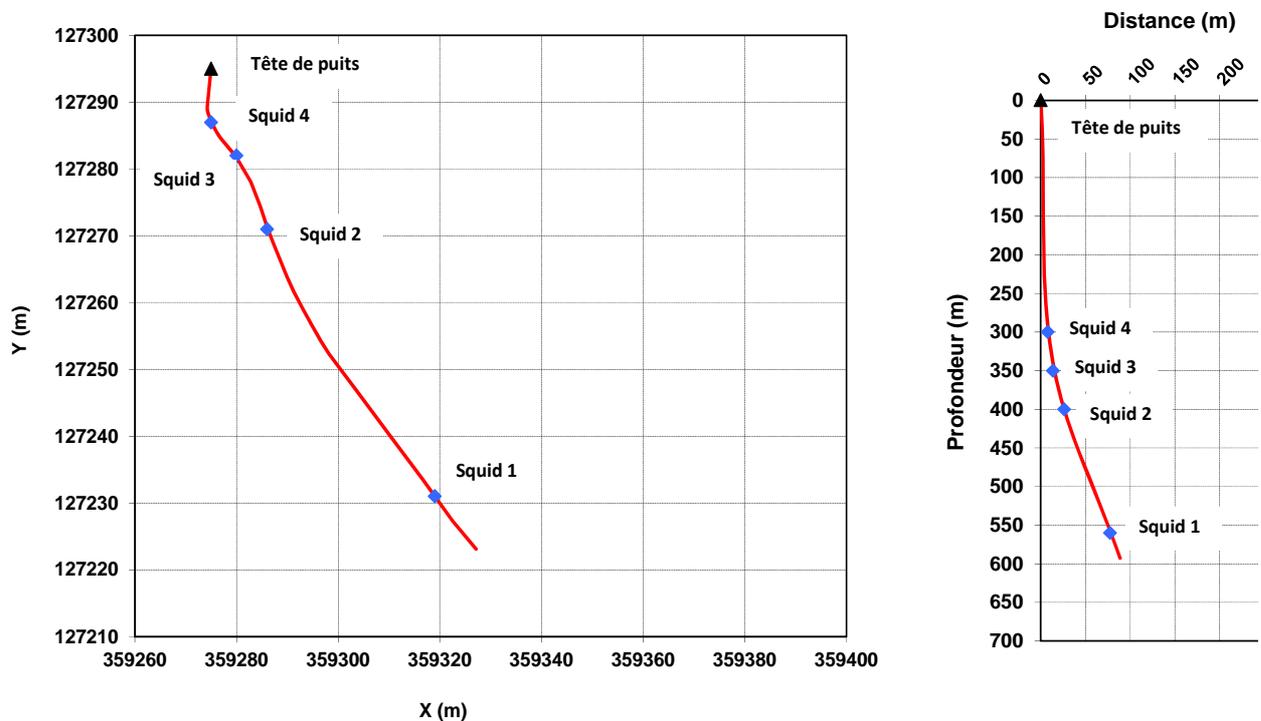


Figure 6 : Déviation du puits LA 405G : dans le plan horizontal (gauche) et dans le plan vertical (droite).

Tableau 2 : Coordonnées & Orientation du capteur tri-axe.

| SONDES | X (LAMBERT III) | Y (LAMBERT III) | Z MD/GL (M) | Z TVD/GL (M) | INC. PUITS | AZIMUT PUITS | STATION KEPHREN VOIES N° |
|--|--------------------|--------------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------------------|
| SQUID™ 4 GALPERIN | 359 275 | 127 287 | 300 | 299.9 | 7° | N183,2 W | 1, 2, 3 |
| SQUID™ 3 TRIÈDRE VERTICAL | 359 280 | 127 282 | 350 | 349.2 | 10.5° | N201,7 W | 4, 5, 6 |
| SQUID™ 2 GALPERIN | 359 286 | 127 271 | 400 | 398.1 | 15.5° | N205 W | 7, 8, 9 |
| SQUID™ 1 TRIÈDRE VERTICAL | 359 319 | 127 231 | 560 | 559.5 | 18° | N215 W | 10, 11, 12 |

Les coordonnées des capteurs ont été calculées à partir des données de la trajectoire du puits LA405 fournies par TEPF et exploitées dans le **rapport d'installation de l'antenne Multi-niveaux SQUID™ (MAG/08/075)**.

- Géophones : SM45 15 Hz avec résistance d'amortissement, sensibilité effective 37 V/m/s.

Paramètres d'acquisition

| | | |
|--------------------|-----------------------------|--|
| Acquisition | Fréquence d'échantillonnage | 1000 points/s |
| | Taille des fichiers | Variable |
| | Gain appliqué | 4 ou 134 nV/count (coef numérisation) |

L'antenne est reliée en surface à une station sismique Kephren, accessible par Internet, à l'adresse : <http://kephrenlacq.dyndns.org>

Référence Rapports d'installation & Caractéristiques Capteurs

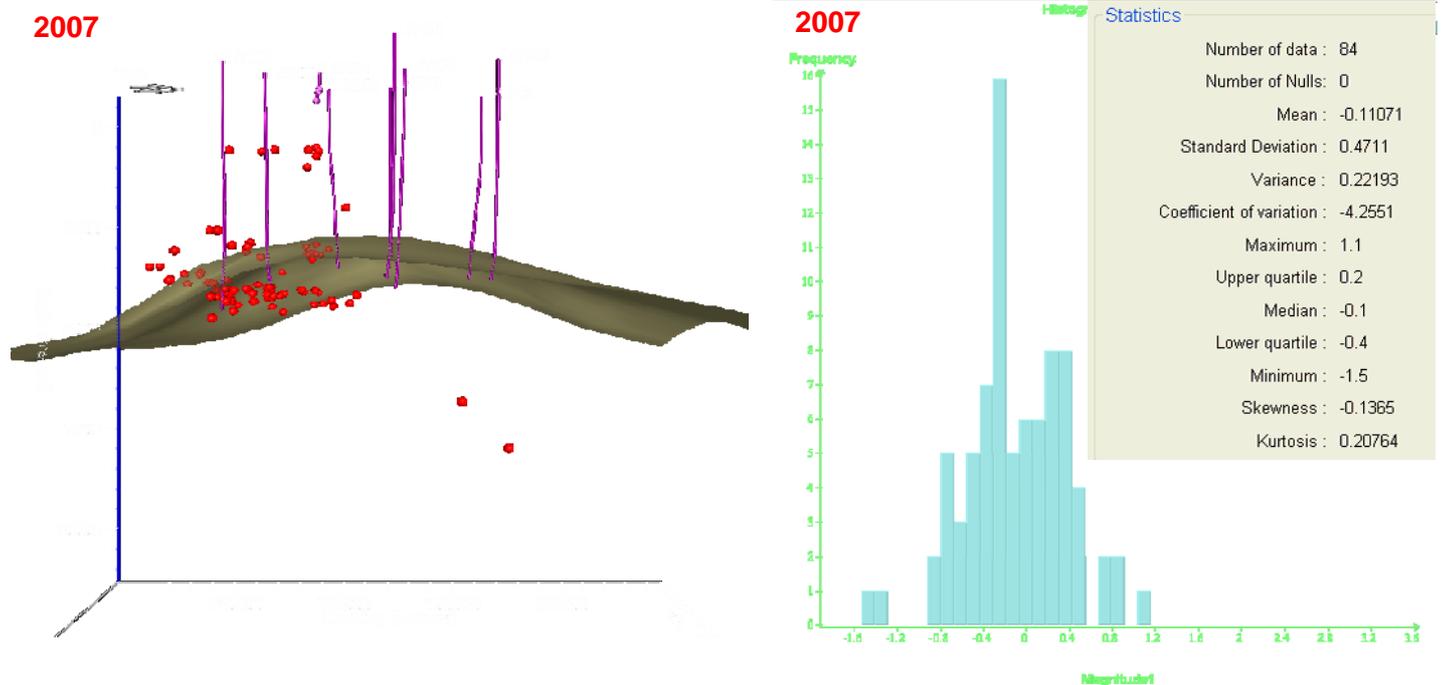
- *Rapport d'installation de l'antenne Multi-niveaux SQUID™ (MAG/08/075)*.

ANNEXE 2 : LA SISMICITÉ INTERNE

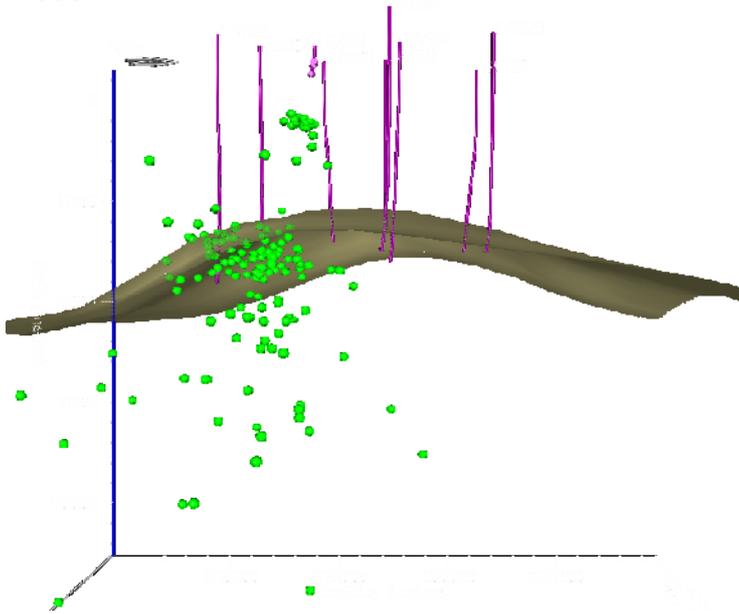
La localisation de la sismicité interne enregistrée à partir du réseau microsismique de Lacq a été effectuée à partir du modèle de vitesse, validé par TEPF, présenté et rédigé par T. Bardainne dans le cadre de la synthèse 2004-2006 (MAG/07/004).

CARTES DE LOCALISATION DE LA SISMICITÉ INTERNE

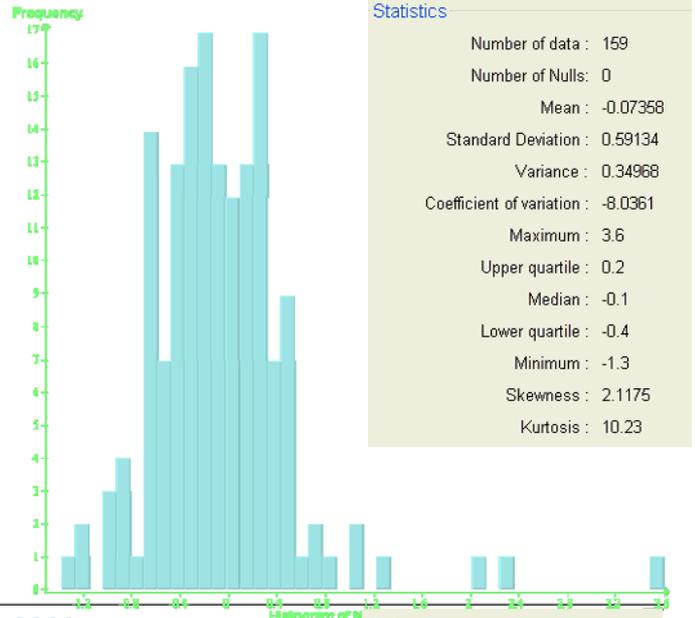
Coupe Y-Z de localisation des événements internes au périmètre de Lacq & Histogrammes des magnitudes calculées des événements



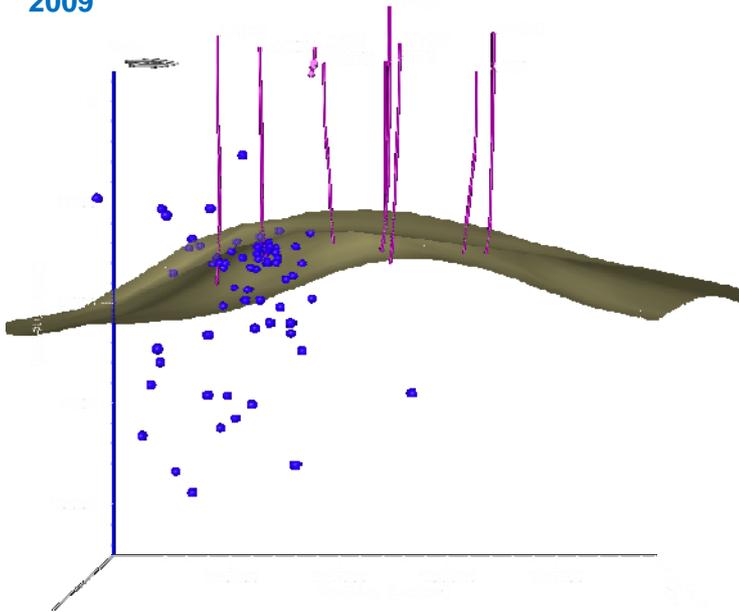
2008



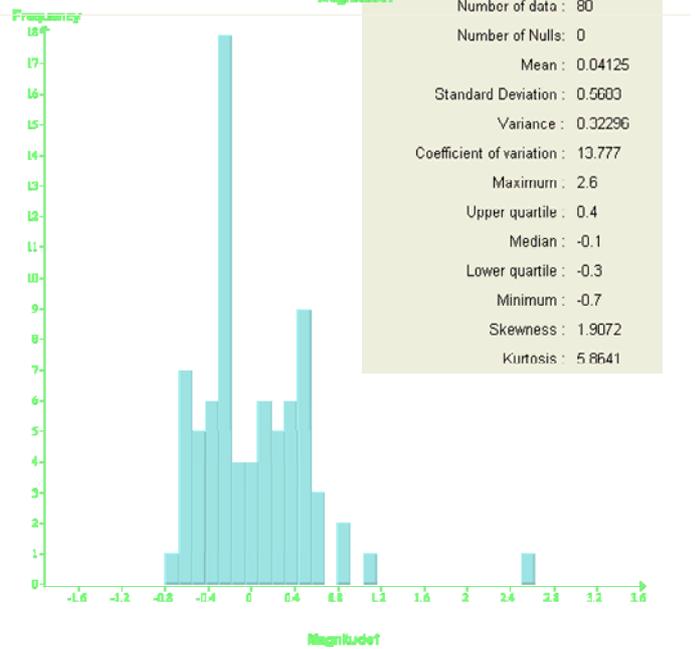
2008



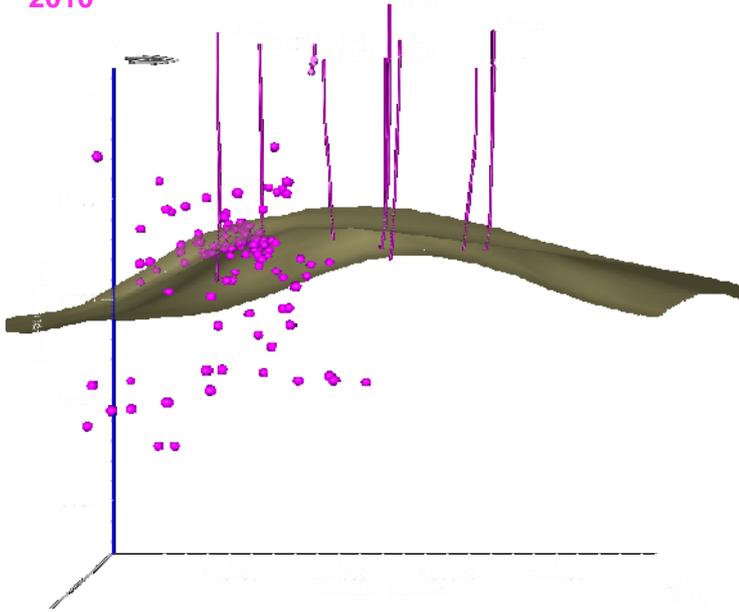
2009



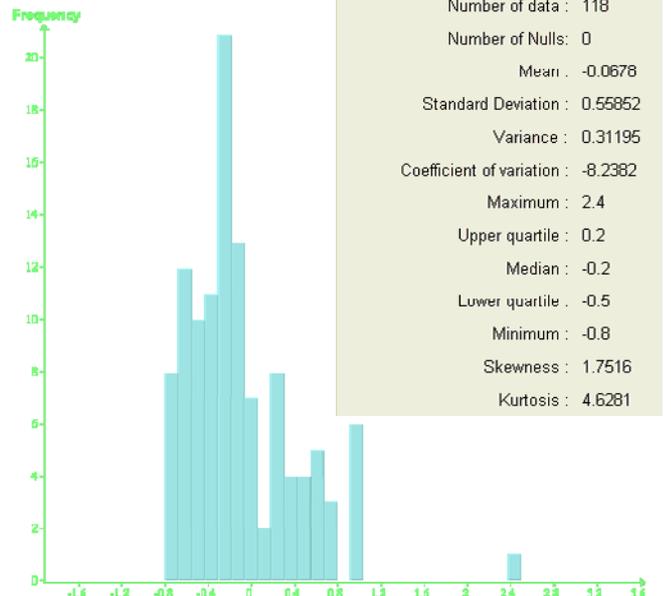
2009



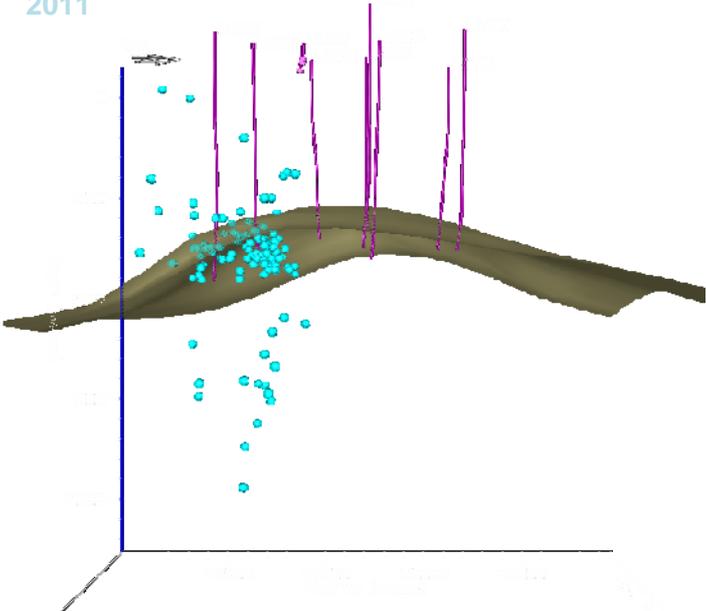
2010



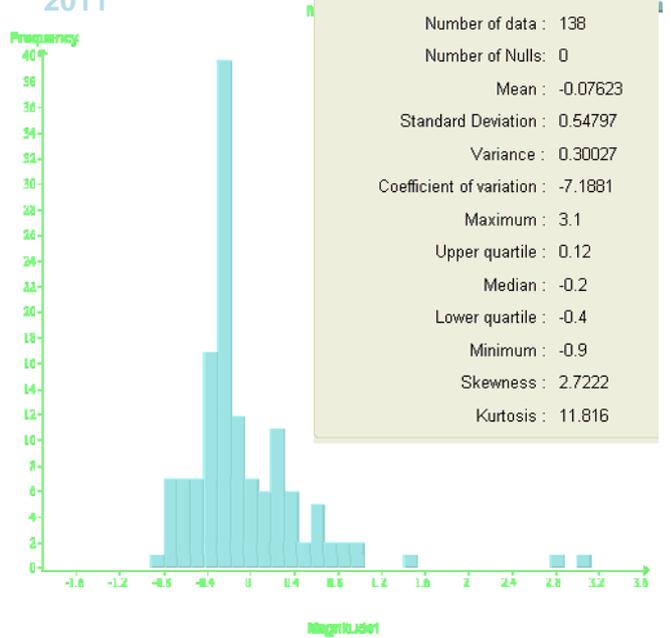
2010



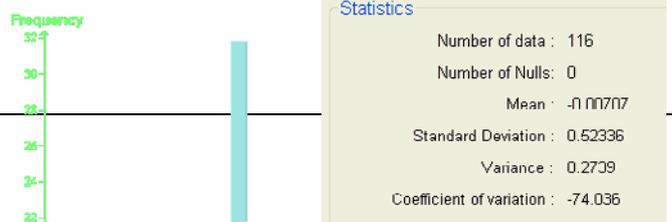
2011

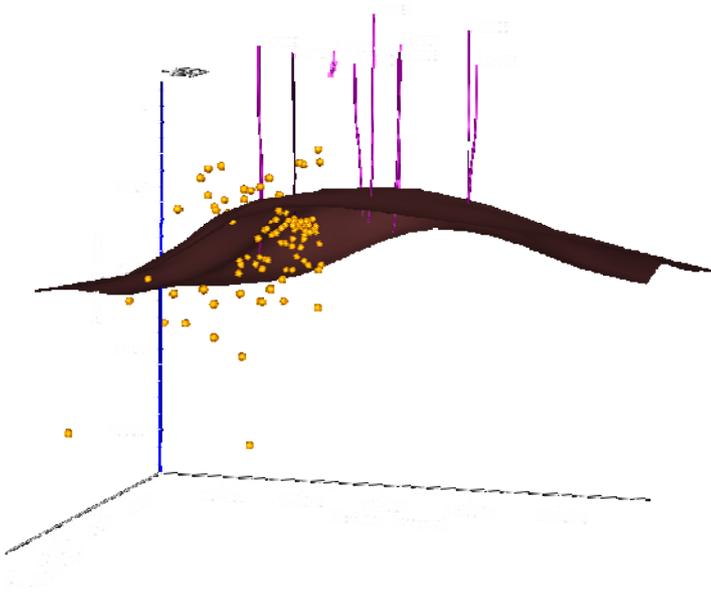


2011

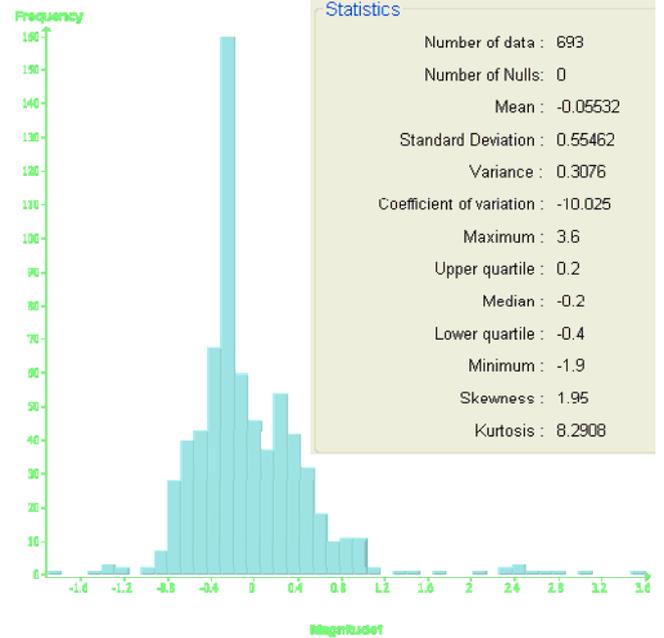
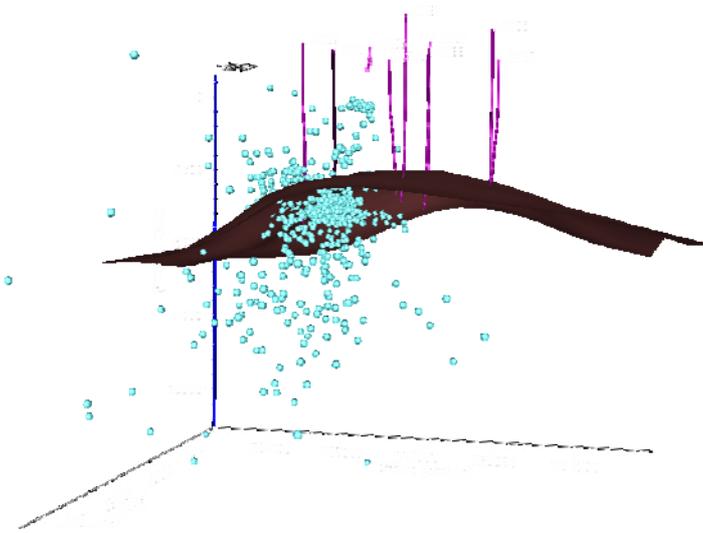


2012

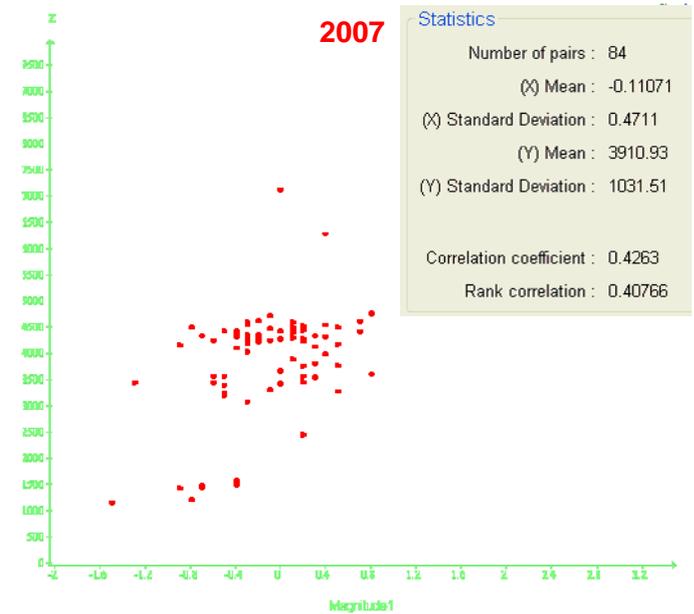
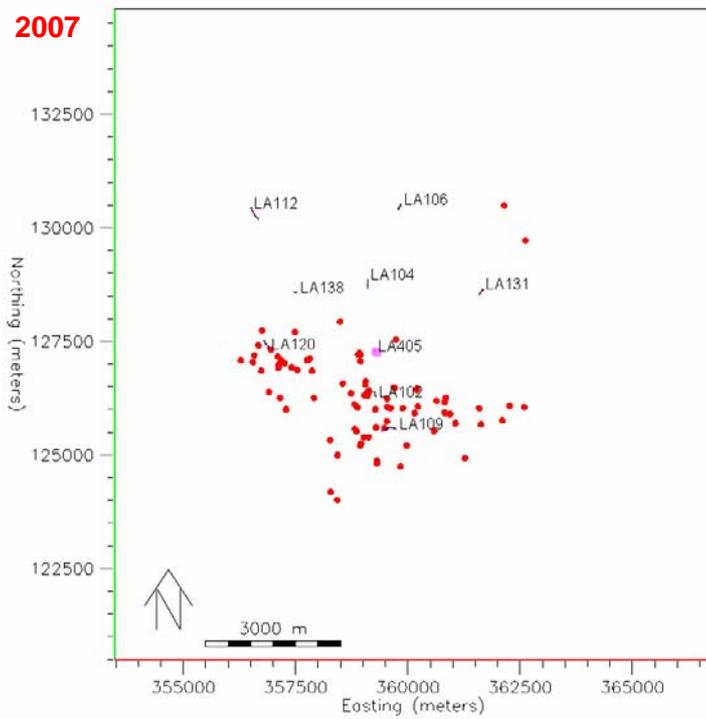




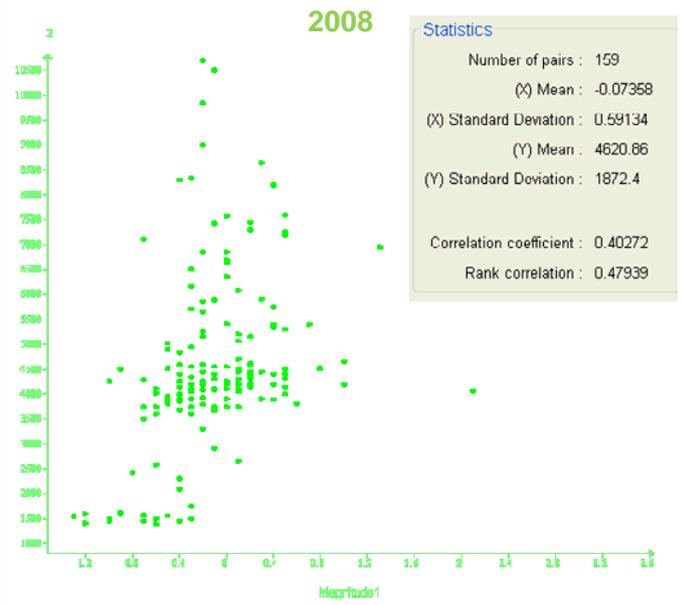
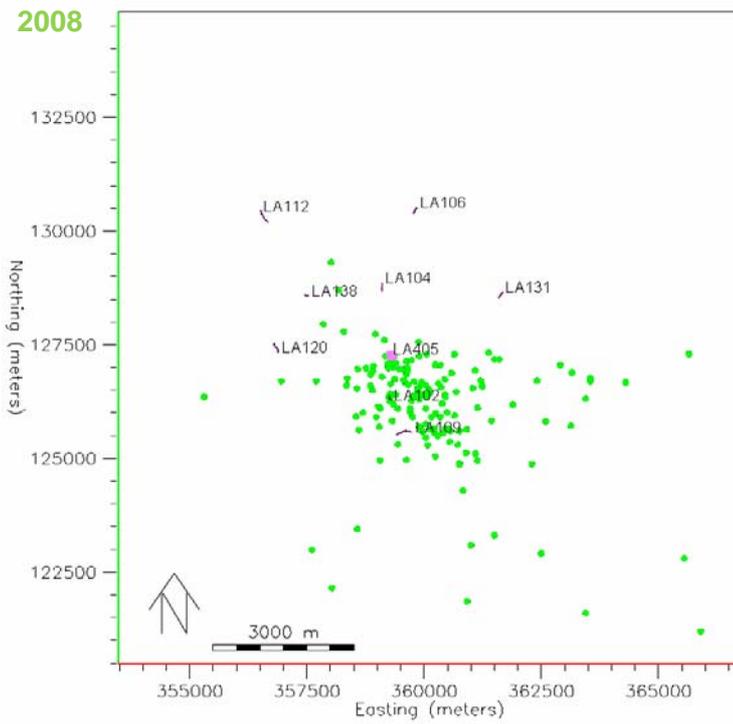
2007 - 2012



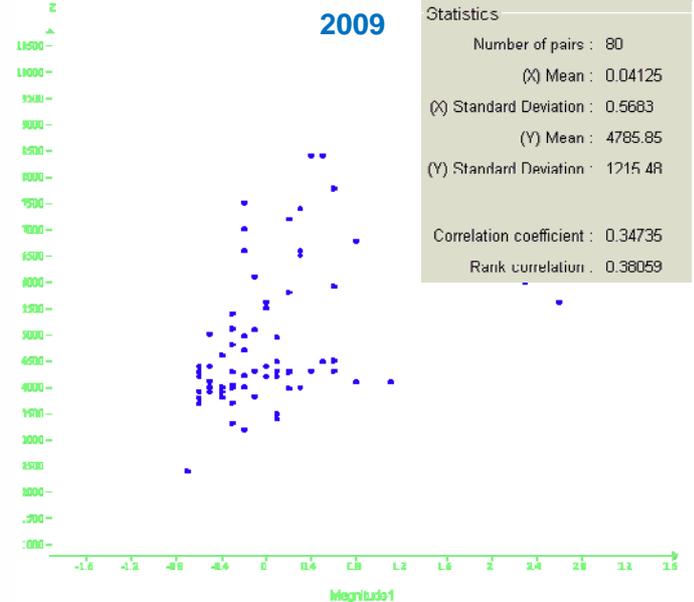
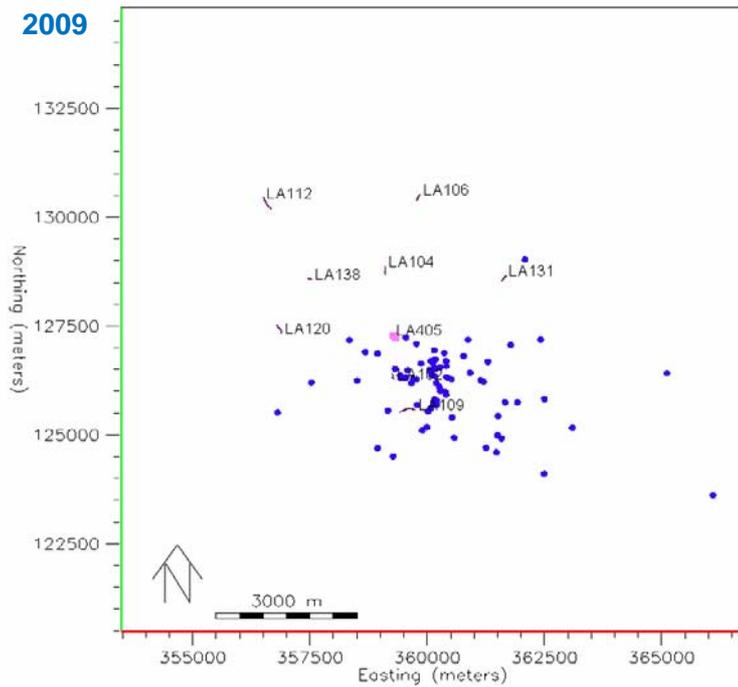
Plan X-Y de localisations des événements internes au périmètre de Lacq



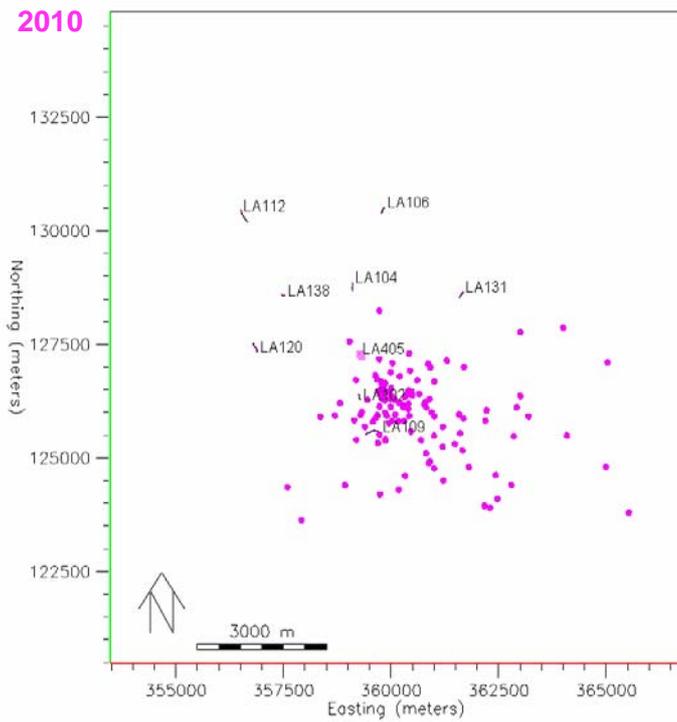
Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.



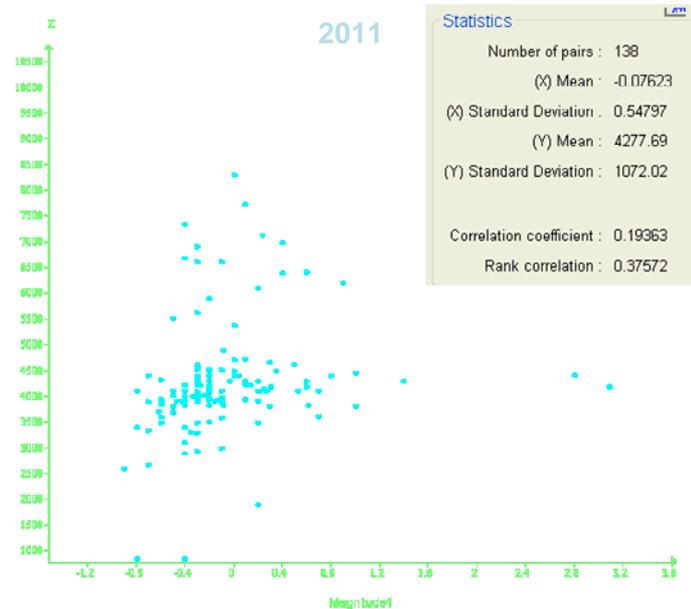
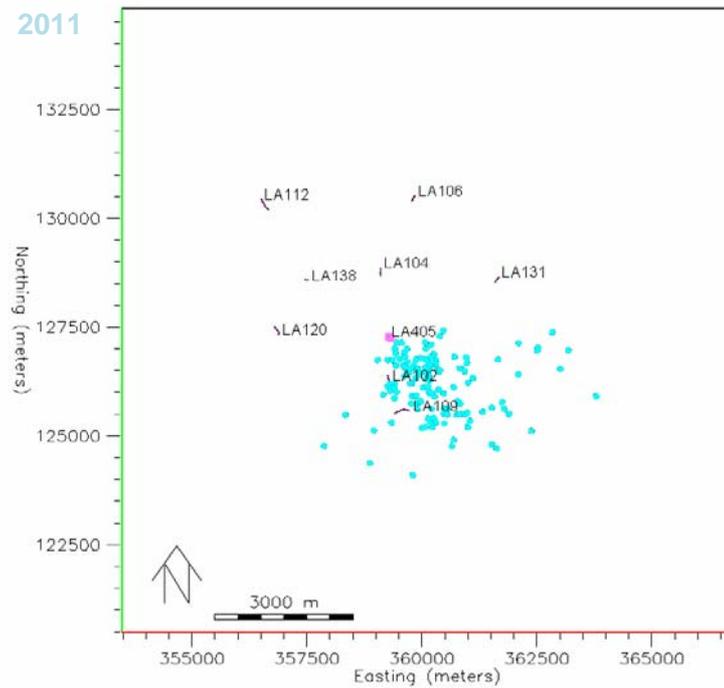
Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.



Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.

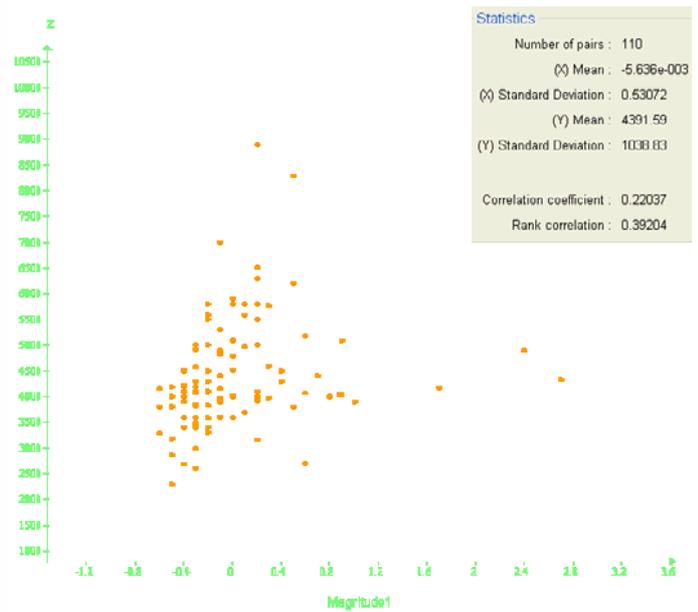
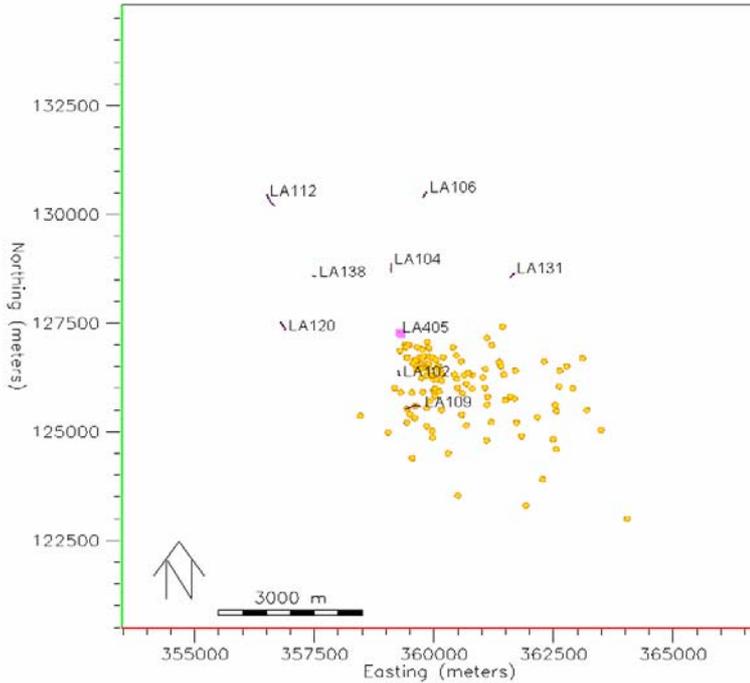


Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.



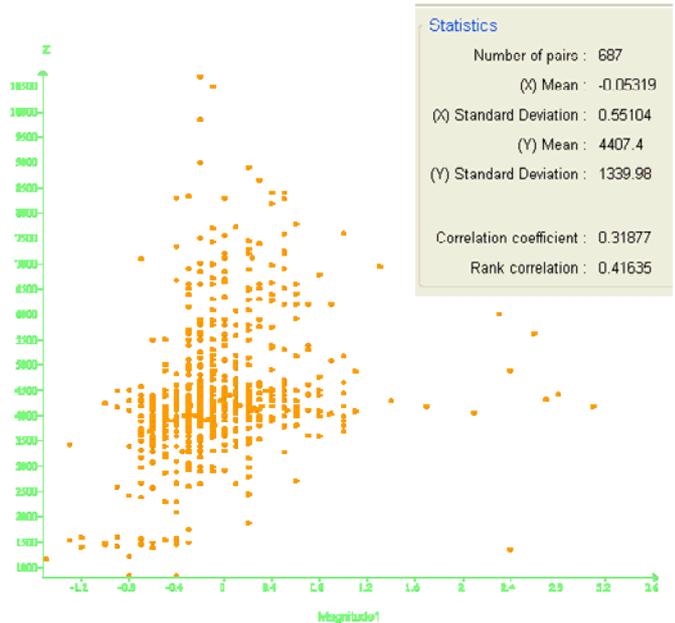
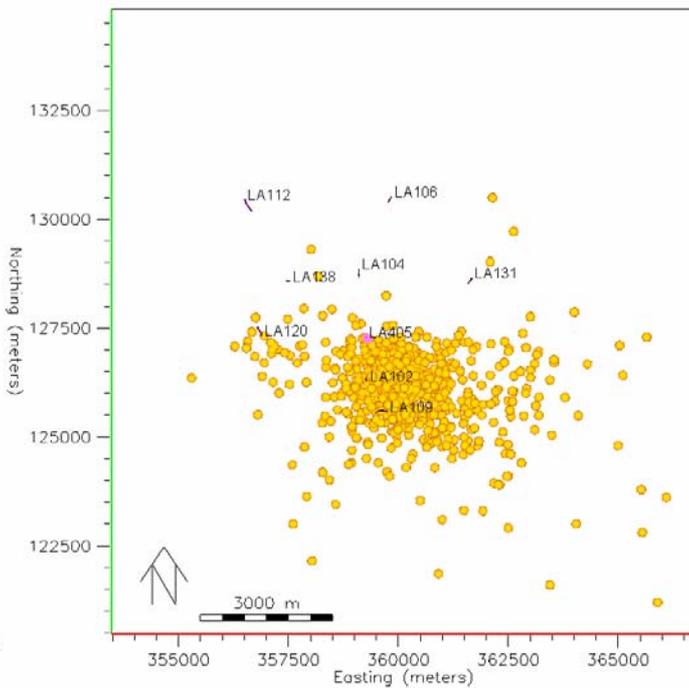
Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.

2012



Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.

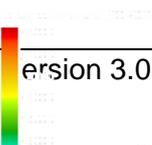
2007-2012

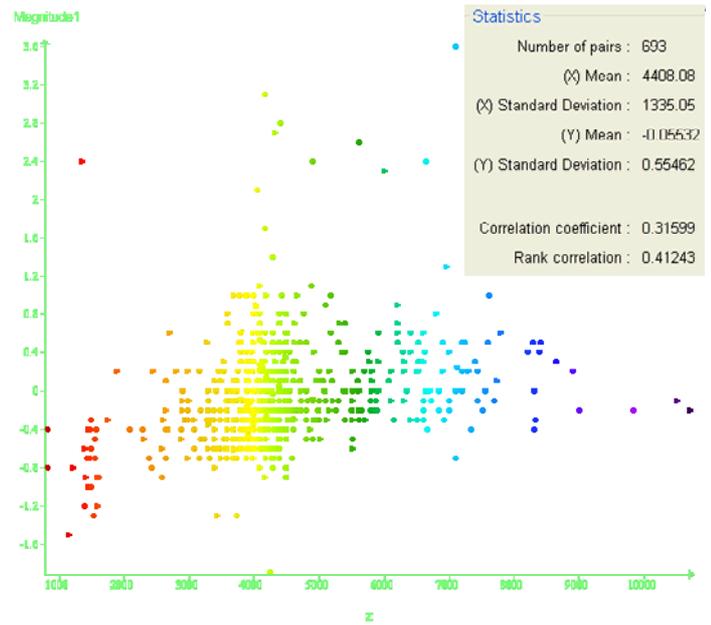
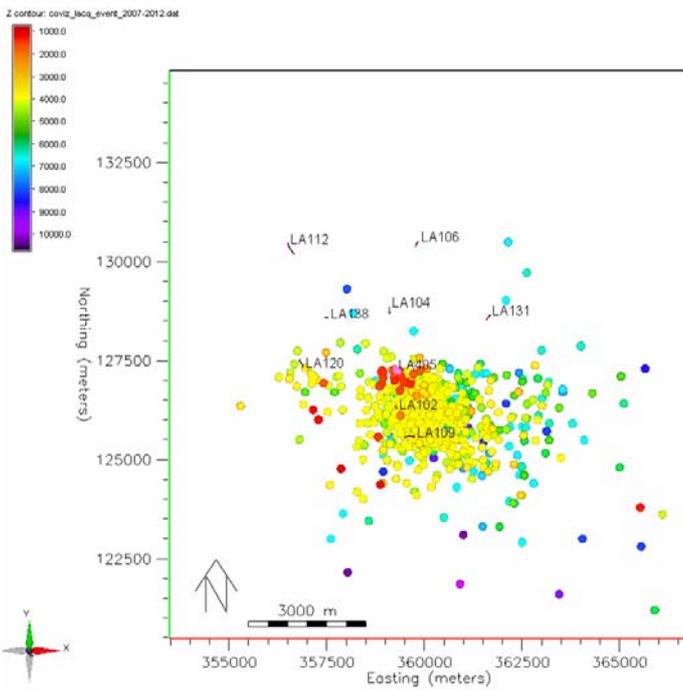
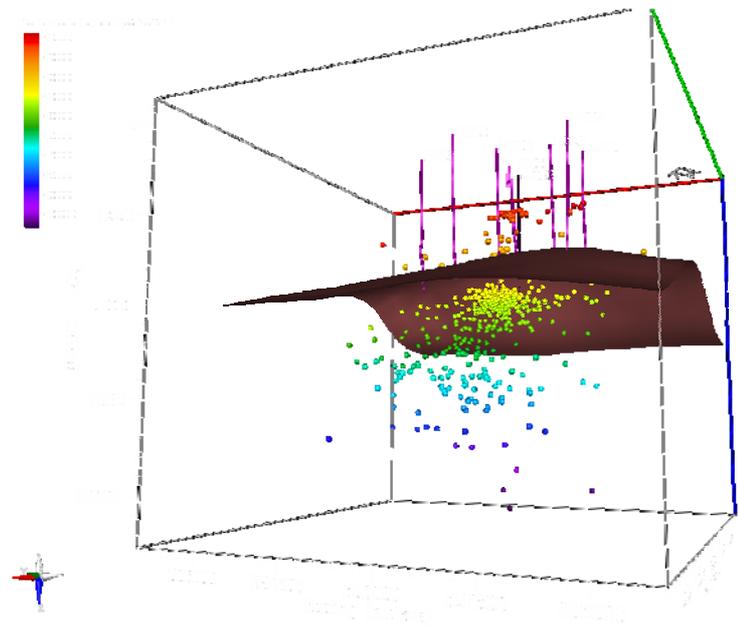


Graphique représentant la magnitude calculée en fonction de la profondeur.

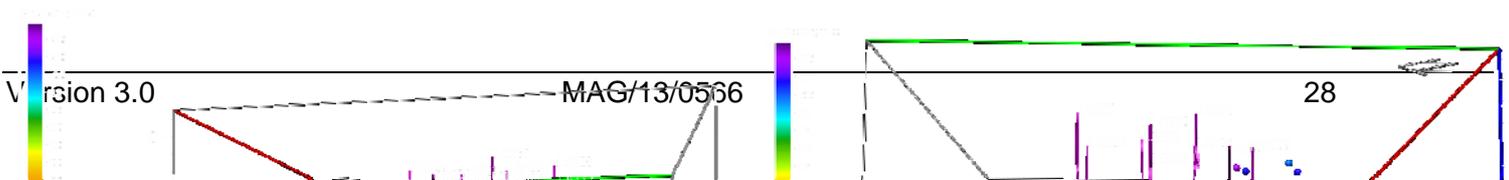
Ensemble de la sismicité localisée de 2007 à 2012.

Les événements localisés sont représentés avec un code couleur en fonction de la profondeur.

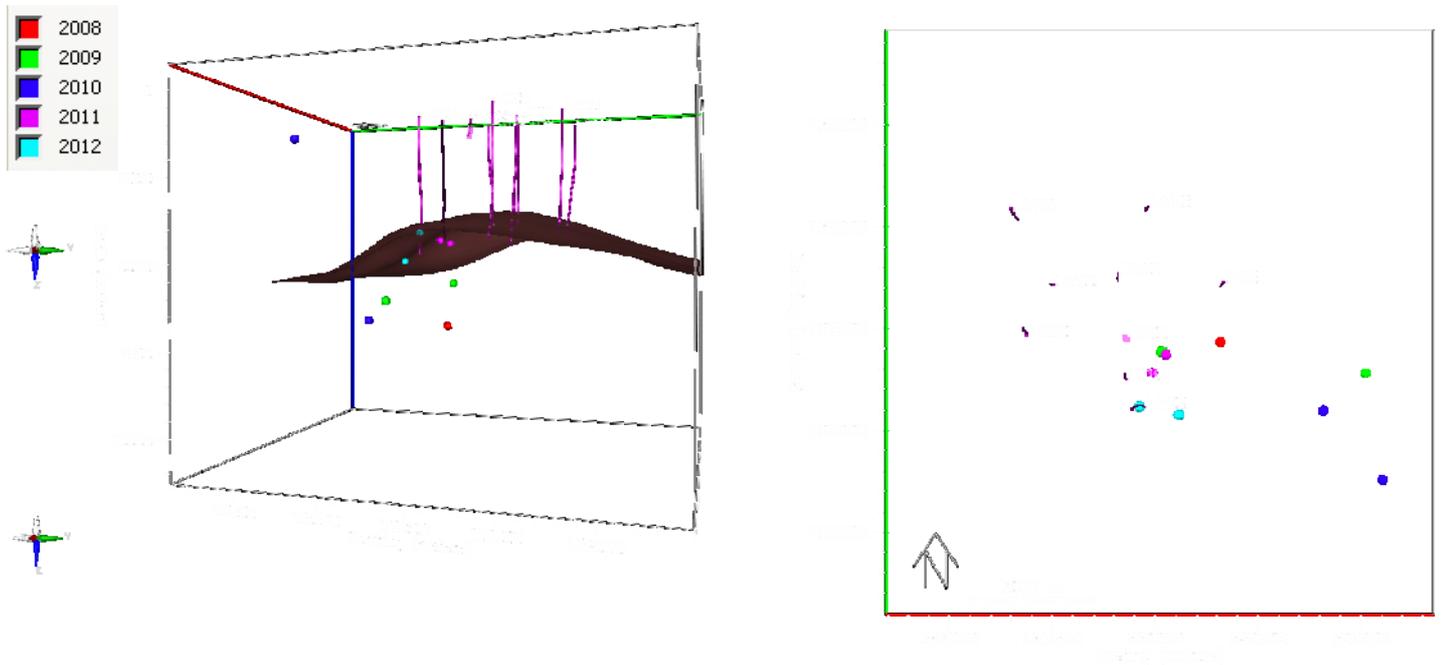




Les événements localisés sont représentés avec un code couleur en fonction de la magnitude.



Carte de localisation des événements corrélés avec les bases de données sismologiques nationales (ReNaSS¹).



¹ Réseau de National de Surveillance Sismique, <http://renass.u-strasbg.fr/>

Tableau 3: Coordonnées des événements corrélés avec les bases de données sismologiques nationales (RéNaSS/CSEM).

| Date | Heure To*(TU) | X (m, Lambert III) | Y (m, Lambert III) | Z (m) | M _w |
|------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-------|----------------|
| 01/03/2008 | 21:43:46 | 361504 | 127176 | 7102 | 3.6 |
| 30/09/2009 | 07:07:22 | 360154 | 126940 | 5617 | 2.6 |
| 08/10/2009 | 12:55:12 | 365108 | 126413 | 6001 | 2.3 |
| 08/01/2010 | 01:53:51 | 365526 | 123792 | 1353 | 2.3 |
| 31/07/2010 | 04:15:50 | 364092 | 125488 | 6645 | 2.4 |
| 03/10/2011 | 05:58:48 | 359928 | 126416 | 4180 | 3.1 |
| 06/10/2011 | 15:37:45 | 359561 | 127412 | 4418 | 2.8 |
| 20/09/2012 | 16:48:02 | 360577 | 125390 | 4903 | 2.4 |
| 19/11/2012 | 02:40:07 | 359615 | 125597 | 3900 | 2.7 |

M_w : Magnitude de moment calculée par les bases de données nationales

** Heure (TU) To Evt est l'heure en Temps Universel de l'occurrence de l'événement*

Les coordonnées des événements sont données en mètres, dans le repère Lambert III cartographique

Evolution de la magnitude en fonction de la distance au capteur de fond des événements sismiques internes localisés à Lacq de 2007 à 2012.

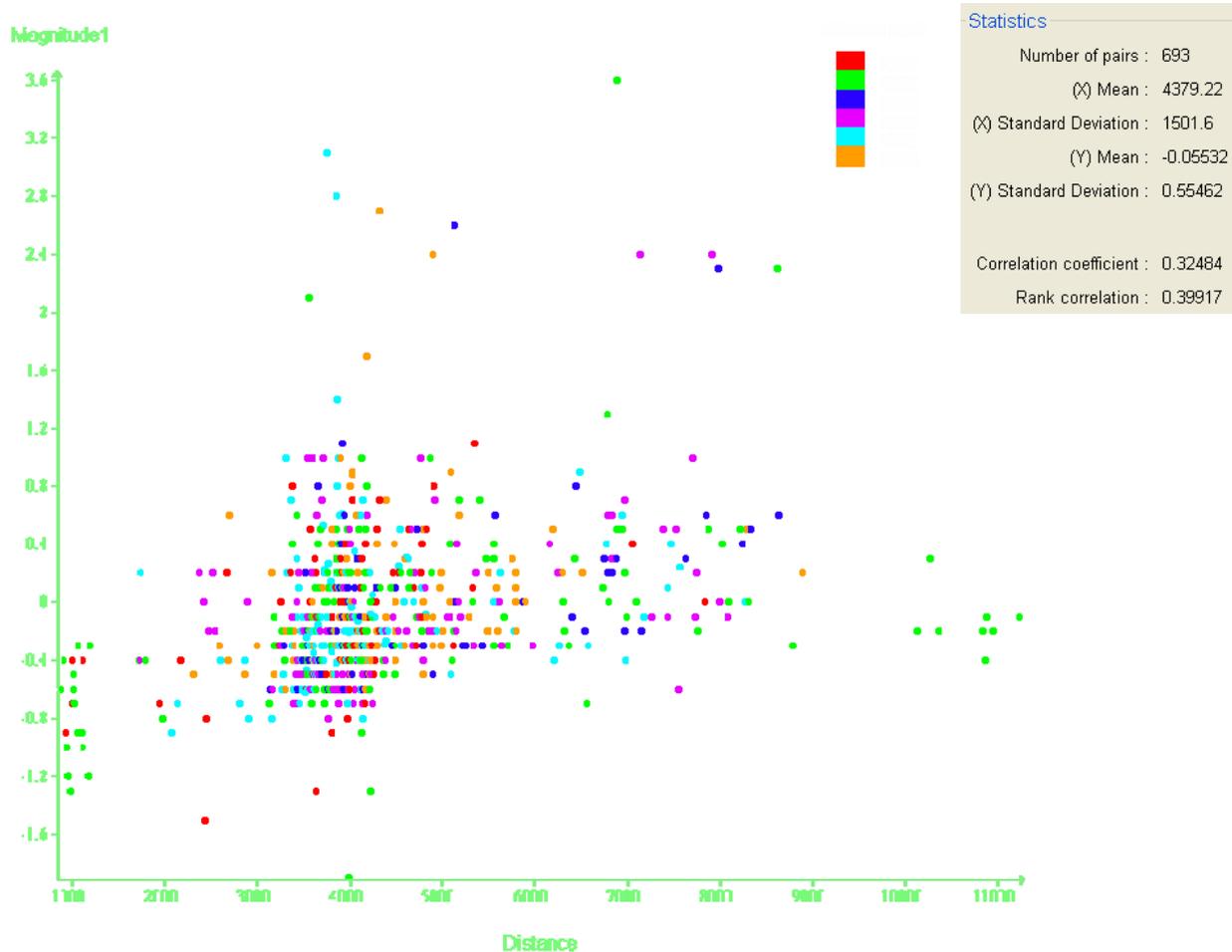


Figure 7: Graphique représentant les magnitudes calculées en fonction de la distance source-capteur fond.

CONCLUSION :

La représentation graphique des magnitudes de Moment des événements en fonction des distances 'source – capteur fond', permet d'identifier la sensibilité effective de localisation du réseau d'écoute.

| Distance source – capteurs (m) | Magnitude de Moment (M_w) | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------|------|
| | M_w | 2007-2011 | 2012 |
| 1000 | -1.7 | -1.7 | |
| 2000 | -1.0 | -1.3 | -0.5 |
| 3000 | -0.8 | -1.0 | -0.6 |
| 4000 | -0.7 | -0.8 | -0.6 |
| 5000 | -0.6 | -0.7 | -0.5 |
| 6000 | -0.4 | -0.6 | -0.3 |

MODÈLE DE VITESSE UTILISÉ POUR LA LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS DE LACQ

Depuis fin 2006, le modèle de vitesse utilisé pour localiser les événements internes au réservoir de Lacq a été mis à jour. Le modèle de vitesse utilisé est une extraction de la loi de vitesse du modèle de vitesse 3D de Lacq (Guyoton 1992, Bardainne 2005) au niveau de (anciennement) la sonde SAS dans le puits LA405. Le modèle utilisé est donc un modèle 1D.

Le rapport V_p/V_s utilisé est de 1.83.

Dans le but d'améliorer la qualité des localisation des événements internes au réservoir de Lacq, il serait important d'utiliser le modèle 3D complet et non un profil de vitesse.

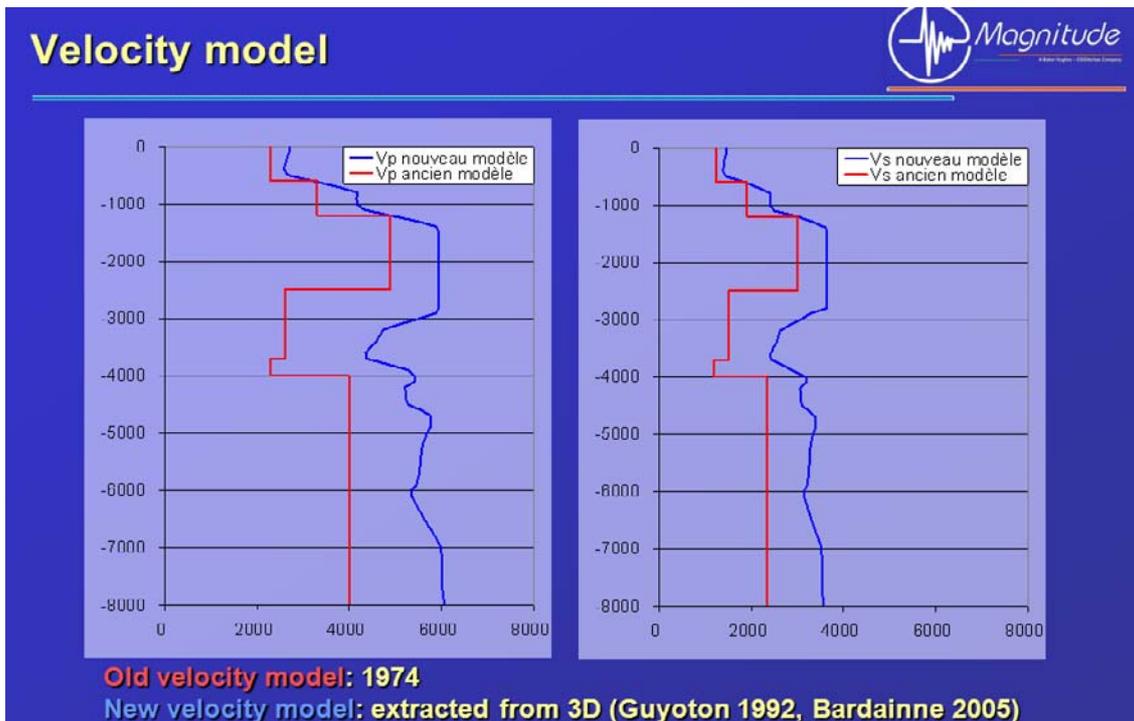


Figure 8: Modèles de vitesse utilisés pour la localisation des événements de Lacq. A gauche les vitesses P et à droite les vitesses S.

CARTES D'INCERTITUDE DE LOCALISATION DES ÉVÉNEMENTS

Les incertitudes de localisations sont très importantes en raison de l'ouverture du réseau, seule une antenne entre 300m et 560m de profondeur pour une cible située à plus de 4000m de profondeur. De plus, l'analyse de polarisation d'un seul capteur triaxe de l'antenne est prise en compte pour la localisation (campagne d'orientation à refaire).

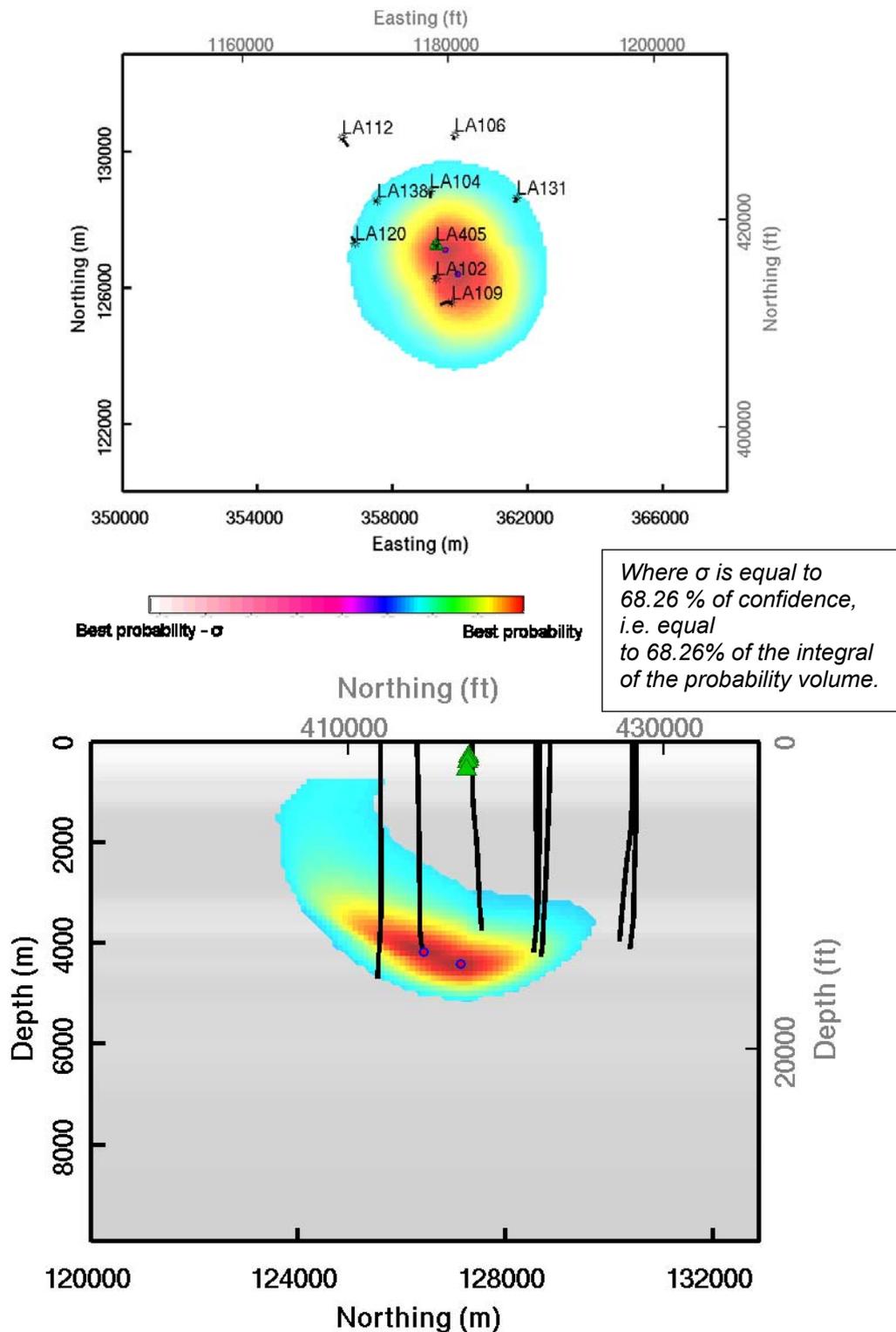


Figure 9: Cartes de localisation de deux événements avec les incertitudes de localisation.

EXEMPLES D'ÉVÉNEMENTS INTERNES

- **Caractéristiques des événements internes au réservoir, enregistrés par la sonde SAS et l'antenne SQUID™ dans le puits LA405 :**
 - Onde P :
 - Détectée essentiellement sur l'axe Z.
 - Fréquence coin < 120 Hz.
 - Onde S :
 - Signal essentiellement sur les axes X et Y.
 - Fréquence coin < 60 Hz.

Au niveau de l'antenne de fond, le signal est non entreteu, de moyennes fréquences (entre 30 et 100 Hz), et détecté par tous les capteurs de façon asynchrone : les premiers capteurs touchés sont les plus profonds (M4) : le signal est ascendant. Ils correspondent aux microséismes enregistrés sur la zone de Lacq, objet de l'écoute sismique.

Exemple d'un événement de $M_w = 2.4$. (Corrélé avec les bases de données du ReNaSS) détecté par l'antenne SQUID™.

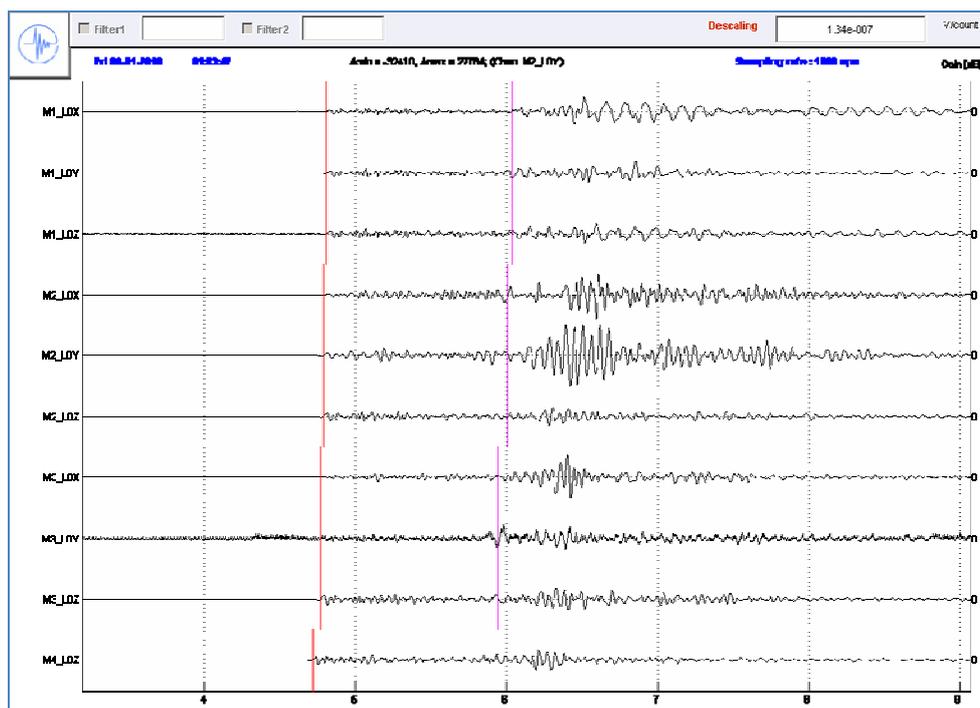


Figure 10 : Evénement interne au site de Lacq enregistré le 08/01/10 à 01h53'51 (T_0 , heure TU) – $M_w=2.4$. Les signaux sont non normés et non filtrés – repère du capteur - différence temps d'arrivée P/S = 1.17 s (capteur M3_L0).

Exemple d'un événement détecté par l'antenne SQUID™ et localisé à 1746m de profondeur

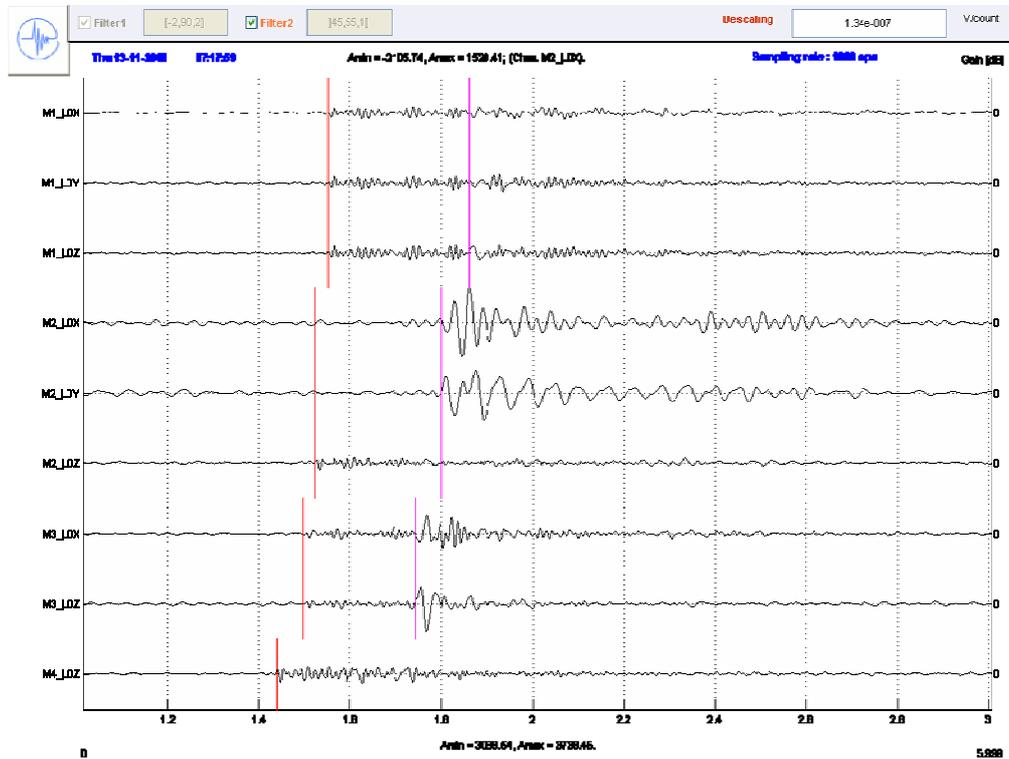
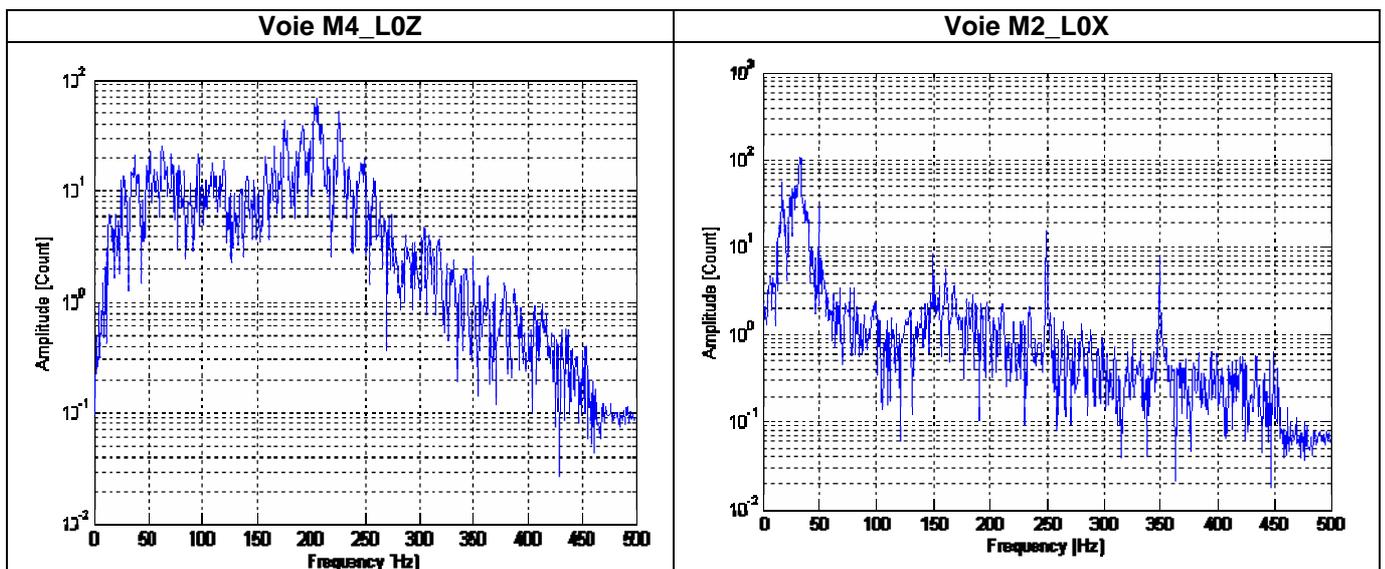


Figure 11 : Evénement interne au site de Lacq enregistré le 13/11/08 à 07h17'59(T_0 , heure TU) – $M_w = -0.3$. Les signaux sont non normés et filtrés passe bas 90 Hz– repère du capteur.

Fenêtre de calcul : 1.2 à 2.4 secondes.

Phases analysées : Ondes P et S (différence temps d'arrivée 0.246 s, capteur M3_L0).

Distance source/capteur : 1195 mètres.



Exemple d'un événement de $M_w = 1.1$ détecté par la sonde SAS.

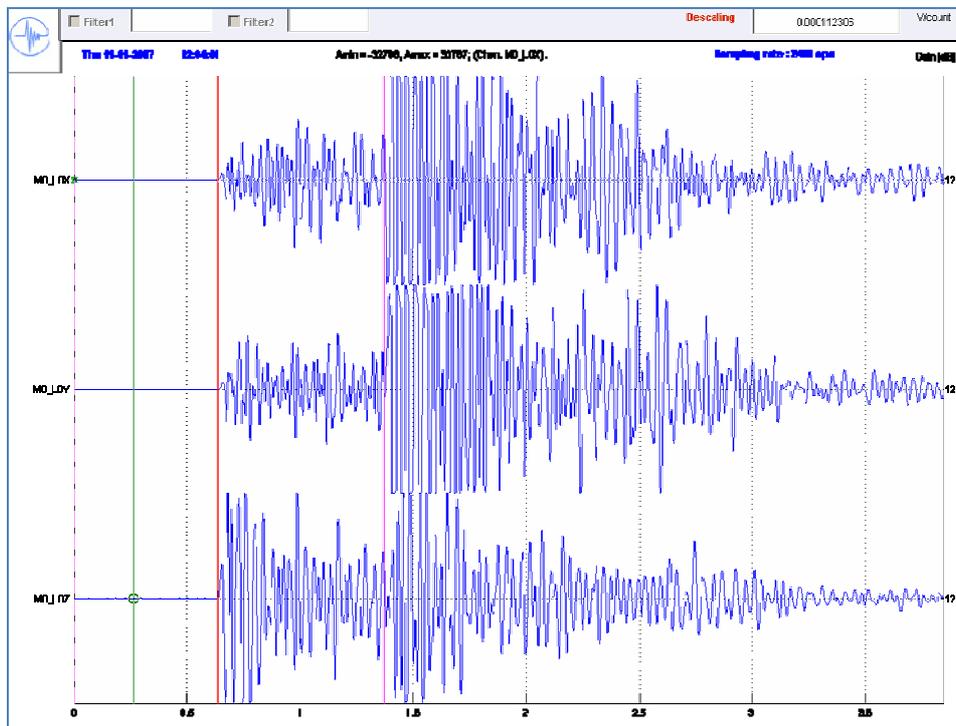
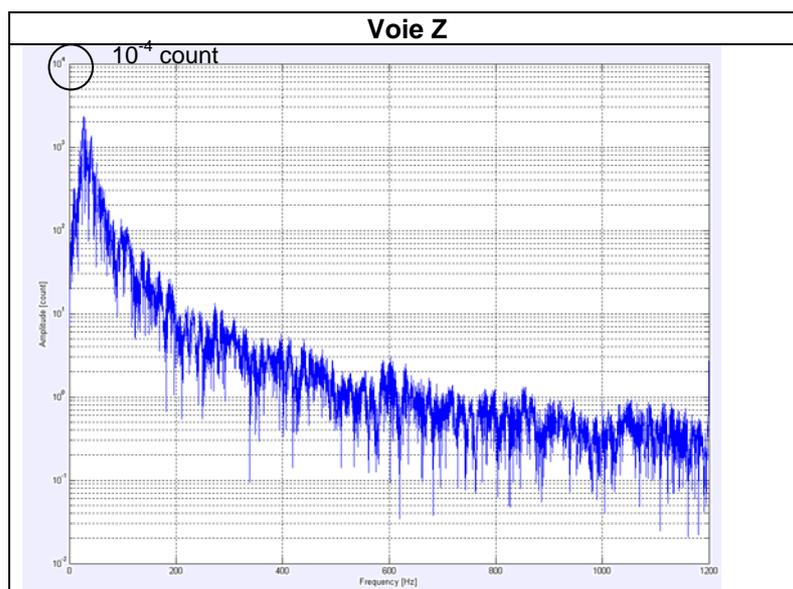


Figure 12 : Événement interne au site de Lacq enregistré le 11/01/2007 à 22h04'41 (T₀, heure TU) – $M_w=1.1$. Les signaux ont été enregistrés par la sonde SAS et sont non normés et non filtrés – repère du capteur. Les voies X et Y sont saturées au niveau de l'arrivée de l'onde S.

Fenêtre de calcul : 0.55 à 3 secondes.
 Phases analysées : Ondes P et S.
 Distance source/capteur : 3352 mètres.



Exemple d'un événement de $M_w = -1.3$ détecté par la sonde SAS.

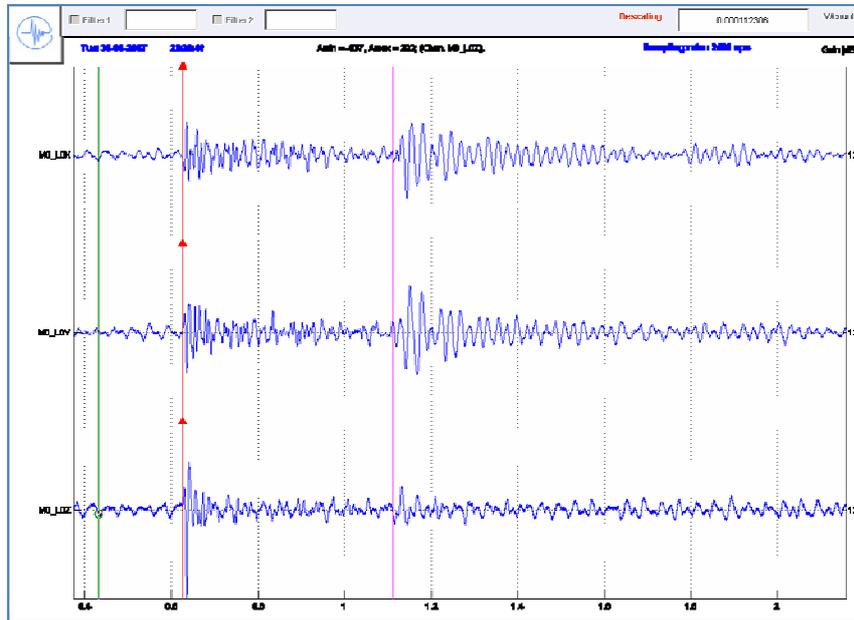
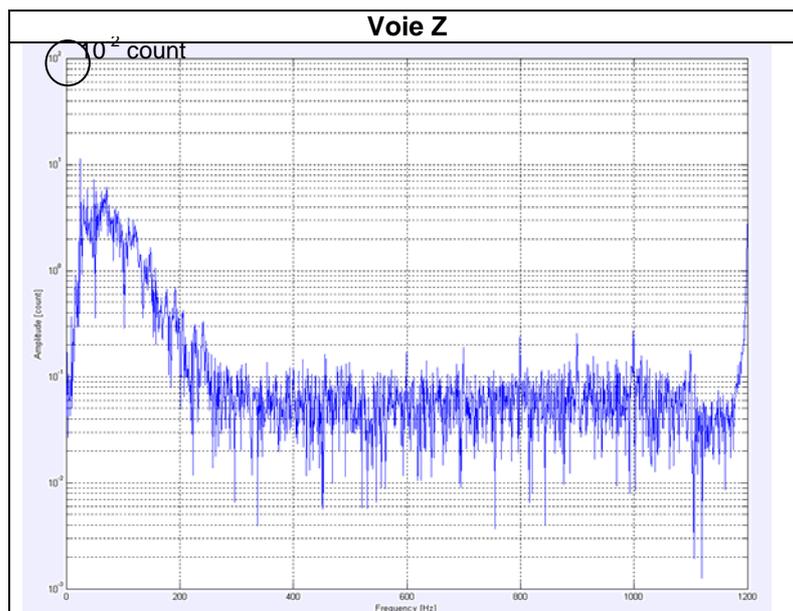


Figure 13 : Evénement interne au site de Lacq enregistré le 30/01/07 à 23h29'41.6 (T₀, heure TU) – $M_w = -1.3$. Les signaux ont été enregistrés par la sonde SAS et sont ni normés et non filtrés – repère du capteur.

Fenêtre de calcul : 0.62 à 1.6 secondes.
 Phases analysées : Ondes P et S.
 Distance source/capteur : 3997 mètres.



ANNEXE 3 : SISMICITE EXTERNE DETECTEE PAR LE RESEAU DE LACQ

Nombre de détections : 24 séismes lointains

- Caractéristiques :

Signal non entretenu, multi fréquentiel mais basses fréquences, de longue durée. Le signal est détecté par tous les capteurs de façon synchrone.

- Origine :

Liste des 24 séismes enregistrés par le système d'acquisition de Lacq de 2007 à 2012, et répartis sur 30 fichiers.

| Date | Heure (TU) | Localisation (ReNaSS) | Magnitude (MI) |
|------------|---|---|----------------|
| 14/01/2007 | 03:51:38 | SSW PAU [43.07 N / 0.62 W] | 2.7 |
| 18/05/2008 | 01:57:22 | SW TARBES [43.09 N / 0.16 W] | 4.1 |
| 01/07/2008 | 19:36:51 | ESE Aramits [43.09 N / 0.56 W] | 2.6 |
| 16/07/2008 | 20:33:34 | S PAU [43.11 N / 0.37 W] | 4.2 |
| 11/08/2008 | 08:40:05 | SE Aramits [43.04 N / 0.64 W] | 2.6 |
| 18/09/2008 | 12:55:52 | S PAU [43.0 N / 0.35 W] | 3.9 |
| 27/11/2008 | 11:40:59 | E Aramits [43.16 N / 0.59 W] | 3.1 |
| 02/12/2008 | 11:48:44 <i>Réparti sur 2 fichiers</i> | NW Aramits [43.36 N / 0.96 W] | 3.2 |
| 03/12/2008 | 17:35:31 | S Pau [43.04 N / 0.48 W] | 2.9 |
| 09/02/2009 | 08:38:30 <i>Réparti sur 3 fichiers</i> | SSE Pau [43.07 N / 0.28 W] | 4.2 |
| 22/04/2009 | 23:50:09 | NW Pau [43.5 N / 0.61 W] | 2.4 |
| 13/07/2009 | 22:42:07 <i>Réparti sur 2 fichiers</i> | NW Pau [43.49 N / 0.59 W] | 3 |
| 10/08/2009 | 10:25:16 | ESE Aramits [43.05 N / 0.52 W] | 3.2 |
| 23/08/2009 | 17:30:29 | ENE Aramits [43.15 N / 0.6 W] | 2.9 |
| 15/10/2009 | 22:28:05 <i>Réparti sur 2 fichiers</i> | SSE Tarbes [43.08 N / 0.20 W] | 3.9 |
| 29/04/2010 | 02:26:43 | NW Pau [43.50 N / 0.62 W] | 2.4 |
| 23/07/2010 | 05:03:03 <i>Réparti sur 2 fichiers</i> | S PAU [43.09 N / 0.33 W] | 3.7 |
| 18/08/2010 | 20:12:16 <i>Réparti sur 6 fichiers</i> | NW Pau [43.5 N / 0.66 W] | 2.4 |
| 14/09/2010 | 12:07:17 <i>Réparti sur 2 fichiers</i> | ENE Saint Jean Pied de Port [43.24 N / 1.05 W] | 3.8 |
| 14/11/2010 | 22:20:26 | SSE PAU [43.01 N / 0.23 W] | 3.2 |

| | | | |
|------------|----------|---------------------------------|-----|
| 27/01/2011 | 04:19:21 | SW Pau [43.17 N / 0.49 W] | 2.5 |
| 08/08/2011 | 04:24:41 | Aramits [43.04 N / 0.51 W] | 2.6 |
| 31/01/2012 | 06:03:59 | SW Pau [43.19 N / 0.52 W] | 2.9 |
| 03/10/2012 | 07:30:21 | N ARAMITS [43.16 N / 0.72 W] | 3.5 |

MI : Magnitude locale

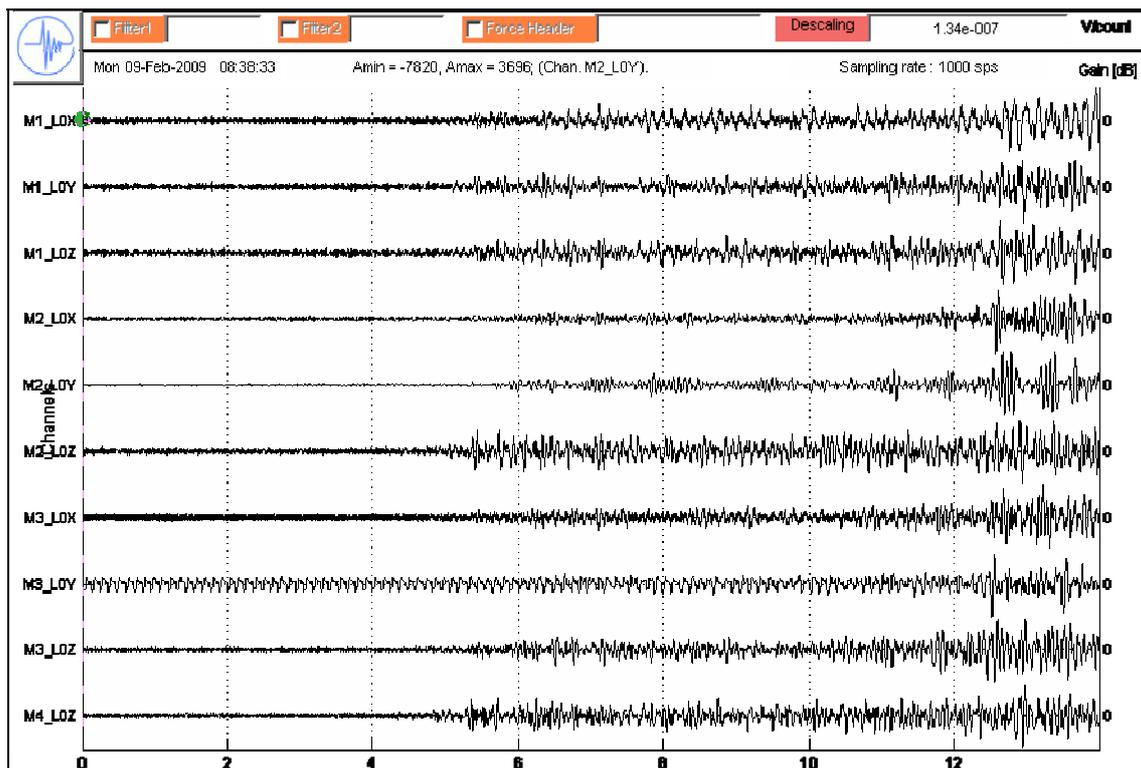


Figure 14 - Séisme enregistré le 09/02/2009 à 08h38 (TU). Signal non normé, non filtré, dans le repère du capteur.

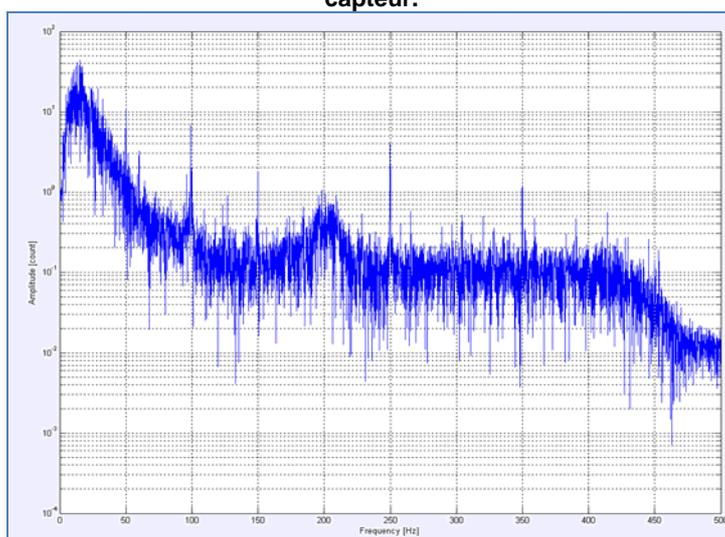


Figure 15: Analyse spectrale du séisme enregistré par la voie Z de la sonde SQUID™ (à -560m), le 09/02/09 à 08h38 (TU.) Fenêtre de calcul : [4s-13s]. Spectres Ondes P & S.

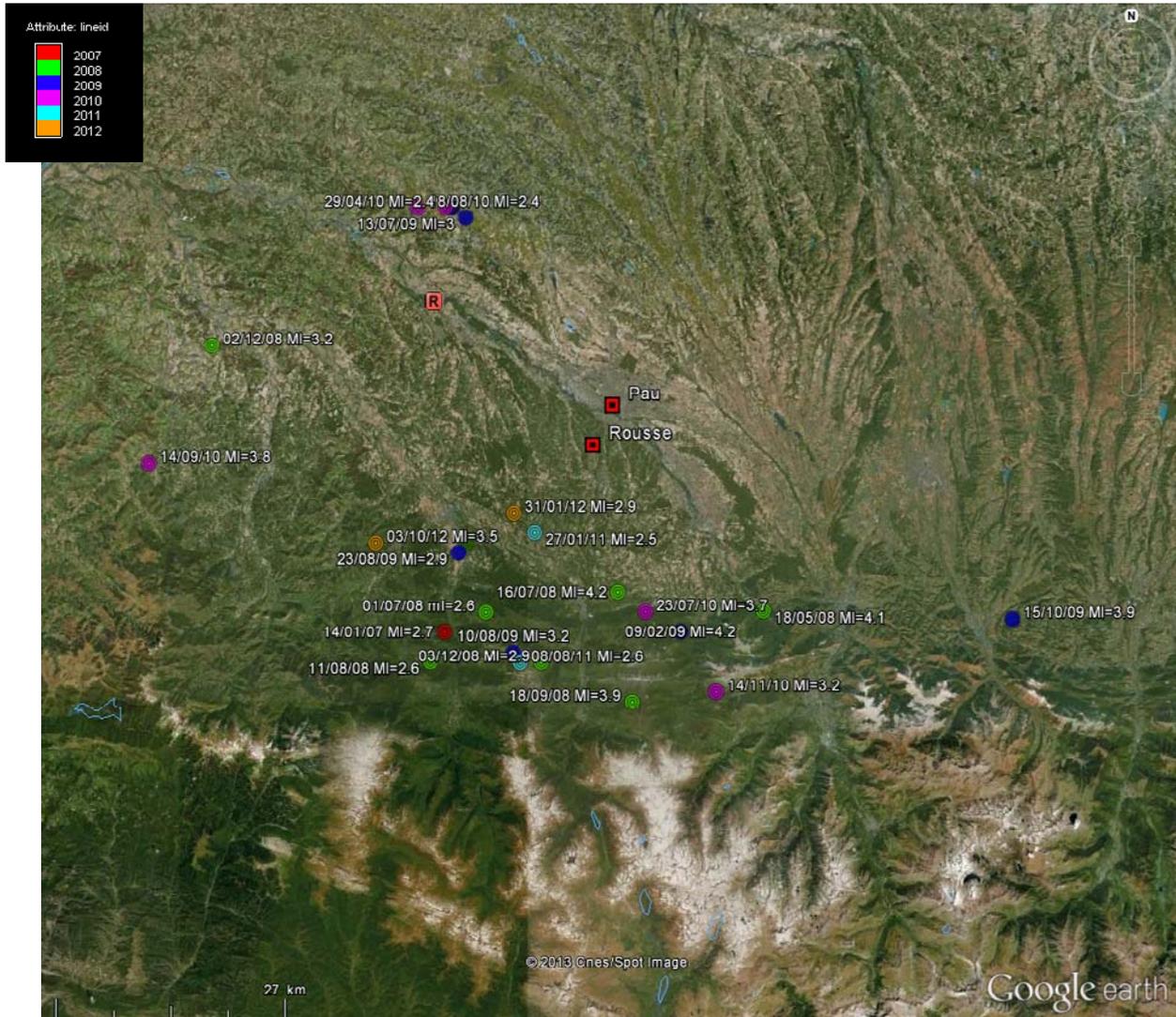


Figure 16 : Séismes enregistrés par le réseau de Lacq de 2007 à 2012 sur une carte Google.

ANNEXE 4 : NIVEAUX DE BRUIT

ÉVOLUTION DU BRUIT DE FOND

L'évolution des niveaux de bruit de fond est basée sur les détections automatiques, déclenchées par les systèmes d'acquisition Seisnum (2007) et Kephren. Un logiciel de contrôle qualité, « NoiseQC » permet une analyse du bruit de fond sur chaque voie de chaque capteur en acquisition sur le site de Lacq.

Différents indicateurs caractéristiques des niveaux de bruit sont calculés pour évaluer le bruit de fond sur Lacq et ainsi, effectuer un contrôle qualité des signaux. Ils permettent donc de comprendre l'origine et les causes d'une évolution brutale (anomalie) du bruit de fond. Cette étude nous permet aussi d'évaluer et d'identifier les potentiels problèmes survenus (contrôle qualité), mais aussi de pointer les périodes sans acquisition.

Les figures ne présentent qu'un seul et même indicateur, l'écart type (déviation standard) du bruit moyen mesuré par les géophones. Les valeurs sont exprimées en $m.s^{-1}$ et les figures ci-dessous sont toutes à la même échelle pour faciliter leur lecture.

Evolution du niveau de bruit de 2007 à 2012 à partir des sondes à -560 m (TVD) (voie Z) en détection :

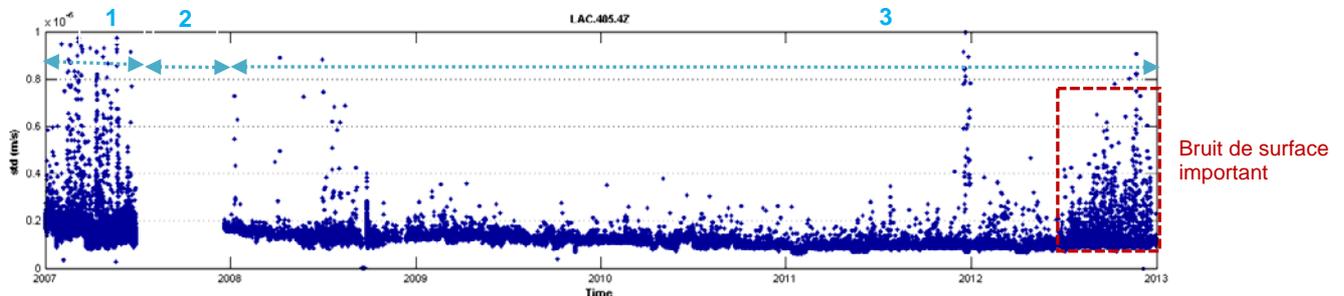


Figure 17 : Evolution du niveau de bruit de 2007 à 2012 à partir des sondes à -560 m (voie Z) en détection :

Période 1 : Sonde SAS en acquisition.
 Période 2 : Sonde SAS hors service – Arrêt acquisition du 15/07/07 au 15/12/07.
 Période 3 : Représentation du niveau de bruit enregistré par la SQUID n°4 à -560m voie Z.

Conclusion :

Le niveau de bruit moyen de la sonde SAS en 2007, est de $1.7 \cdot 10^{-7} m.s^{-1}$ durant les heures et jours non ouvrables. En effet, pendant l'année 2007, des travaux de surfaces à proximité du puits LA405 occasionnaient une augmentation périodique (heures et jours ouvrables) du niveau de bruit. La valeur donnée ne tient pas compte de ces périodes de travaux.

Le niveau de bruit de la sonde SQUID™ de fond (à -560m) est de $1.5 \cdot 10^{-7} m.s^{-1}$ jusqu'en juillet 2010, lors de la visite de maintenance. Après l'installation d'un système d'alimentation électrique sur batterie, le niveau de bruit a légèrement baissé due à la diminution du parasitage enregistré par le système.

Le niveau de bruit, depuis août 2010, est très légèrement en baisse avec une valeur de 1.10^{-7} m.s⁻¹ pour l'année 2011. Fin décembre 2011, la voie Z étant en défaut périodique, le niveau de bruit fluctue brutalement de 1.10^{-7} m.s⁻¹ à $1.5.10^{-6}$ m.s⁻¹. Elle a donc été mise hors détection le 20/12/2012.

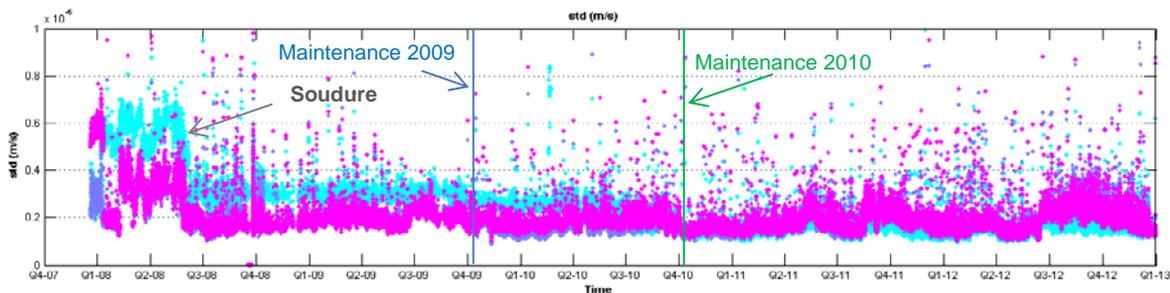
A partir de début août 2012, on observe des variations sensibles et épisodiques du niveau de bruit, à corrélérer avec des activités en surface. Ces variations apparaissent suivant un cycle d'une semaine, associées aux jours ouvrés.

Evolution du niveau de bruit à partir des différents niveaux de l'antenne de décembre 2007 à 2012 :

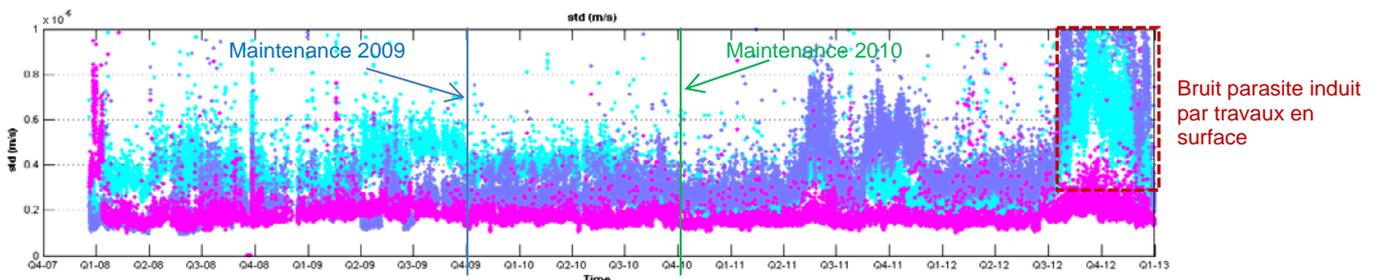
Légende (code couleur) des figures présentées ci-dessous :



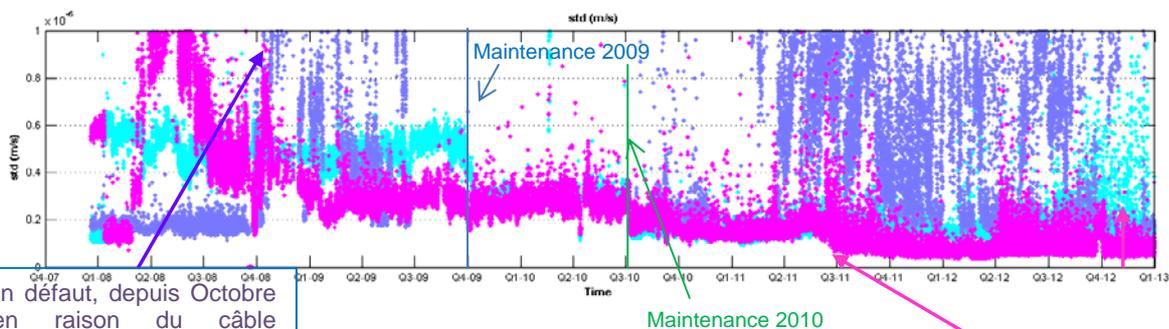
Voies M1 L0 / LAC.405.1 : SQUID™ 4 (Galperin à -300m)



Voies M2 L0 / LAC.405.2 : SQUID™ 3 (Trièdre vertical à -350m)



Voies M3 L0 / LAC.405.3 : SQUID™ 2 (Galperin à -400m)



Voie Y en défaut, depuis Octobre 2008 en raison du câble endommagé dans le puits.

Défaut sur la voie Z depuis le 12/06/2011, en raison du câble endommagé dans le puits.

ANNEXE 5 : PARAMÈTRES DE DETECTION

Système d'acquisition Seisnum (2007) :

Le seuil de détection correspond à la valeur (en ms^{-1}) du système d'acquisition déclenchant un enregistrement si la mesure sismique dépasse cette même valeur.

Les très fortes variations du bruit et la perte de sensibilité associée à la mise en place du seuil adapté aux nombreux bruits de surfaces (travaux) ont amené à la mise en place du calcul automatique du seuil à partir des enregistrements du niveau de bruit. Celui-ci est calculé toutes les 5 minutes et le seuil est calculé par la relation : **Seuil = « Déviation standard du bruit » x 10. Ce calcul automatique du seuil offre une sensibilité équivalente à un seuil fixe en période calme et empêche l'enregistrement d'un grand nombre de bruits.**

Système d'acquisition Kephren (2007 - 2012) :

Nombre de voies pour déclencher une détection sur la station Kephren : 1

Voie en détection : Voie Z de la sonde SAS et SQUID™ 1 à -560 m.

Pratiquement, le système de détection de la station Kephren repose sur le calcul du rapport d'amplitude du sismogramme d'une fenêtre courte (STA) sur une fenêtre longue (LTA), ces deux fenêtres couissant au cours du temps. Le calcul génère une fonction caractéristique par fenêtre (STA et LTA). Le seuil de détection étant lui aussi un rapport dépendant directement de la valeur de la fonction propre du LTA et variant au cours du temps, le système déclenche une détection lorsque le STA dépasse le seuil.

Comparatif des seuils de détection entre les deux systèmes :

| | Sonde SAS | | | Sonde SQUID™ | | | | |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------|--|-----------------|--------------------------------------|------|---|
| | Bruit de fond en m.s^{-1} | Seuil en μV | Seuil en m.s^{-1} | Bruit de fond (en 10^{-7} m.s^{-1}) | Seuil (STA/LTA) | Seuil (Equivalent en μV) | | Seuil de détection (10^{-6} m.s^{-1}) <small>Sta/Lta x 3 x Std</small> |
| 2007 | $1.7 \cdot 10^{-7}$ | 40 | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | 1.5 | 3 | 50 | | 1.35 |
| 2008 | | | | 1.5 | 3 | 50 | | 1.35 |
| 2009 | | | | 1.33 | 3 3.5 | 44.3 | 51.6 | 1.2 1.4 |
| 2010 | | | | 1.33 | 3.5 | 51.6 | | 1.4 |
| 2011 | | | | 1 | 3.5 | 38.9 | | 1.05 |
| 20/12/11- 25/01/12 | | | | 1.5 | 3.5 | 60 | | 1.6 |
| 2012 | | | | 1 | 3.5 | 38.9 | | 1.05 |

Le rapport STA/LTA est passé de 3 à 3.5 en 2009 suite à des travaux augmentant périodiquement le niveau de bruit, induisant des détections continues. Cette modification du seuil n'induit pas de changement notable de la sensibilité du réseau.

Du 20/12/11 au 25/01/12, en raison de défaut de transmission sur la voie Z de la SQUID™ 1, cette voie a été retirée de la détection et remplacée par la voie X de la SQUID™ 2.

ANNEXE 6 : LES CARTES DE SENSIBILITÉ DE DÉTECTION

DÉFINITION

La carte de sensibilité d'un réseau sismologique représente la capacité de ce réseau à détecter un événement sismique d'une magnitude donnée pour une position donnée.

Le principe de calcul est expliqué dans le rapport MAG/09/0739 rédigé et envoyé le 04 Septembre 2009 par E. Gaucher à la demande et pour le compte de TEPF dans le cadre du projet ROUSSE.

La carte de sensibilité du réseau définit l'énergie minimale d'un événement sismique nécessaire pour déclencher une détection en fonction de sa localisation et de la distance aux capteurs.

La loi d'atténuation des ondes sismiques retenue prend uniquement en compte l'expansion géométrique du front d'onde. Elle permet de calculer l'amplitude (et donc la magnitude) des signaux sismiques en fonction de la distance. La loi retenue est en $1/d^2$.

Les paramètres pris en compte sont :

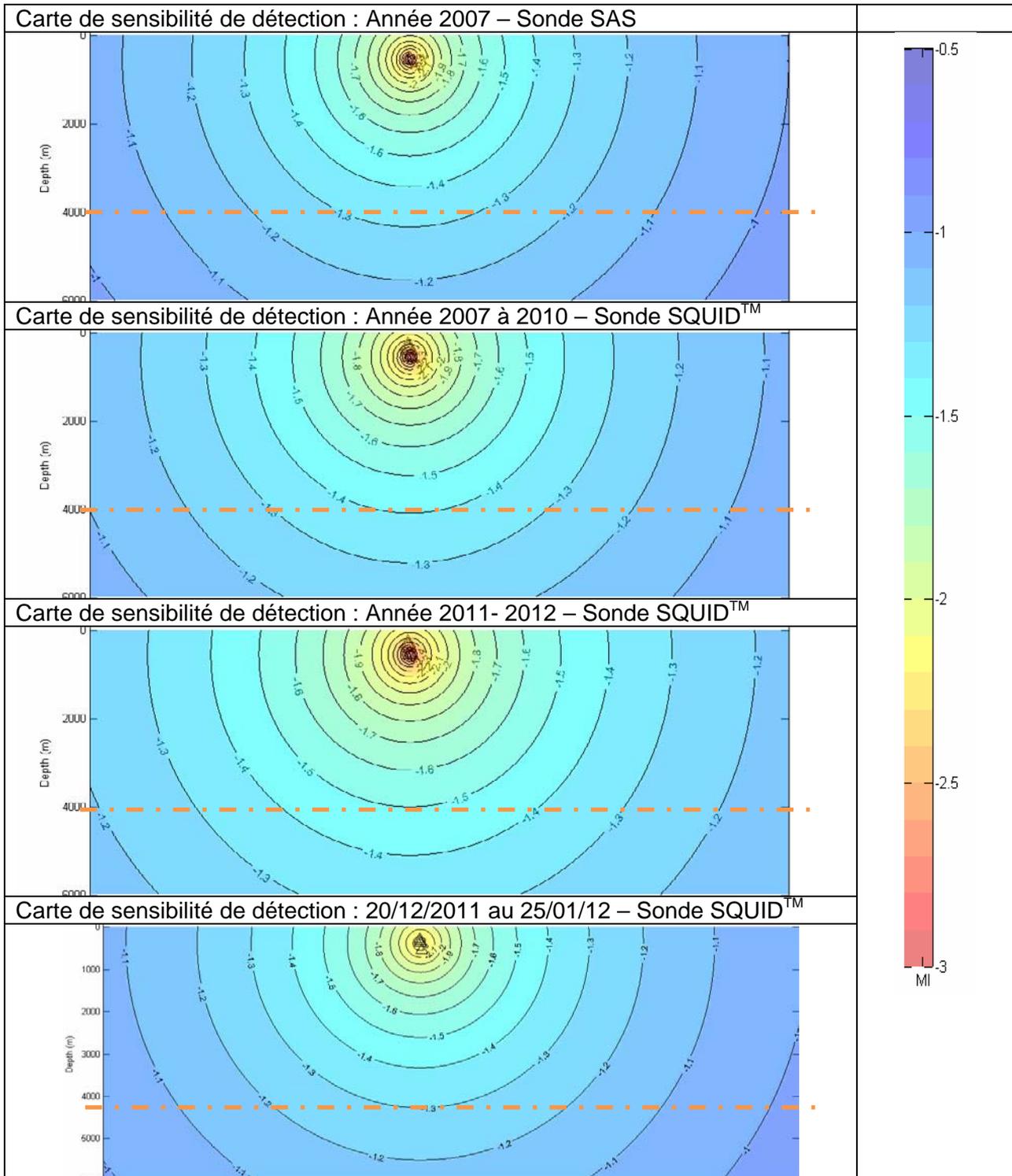
- Le nombre de voies en détection,
- Le seuil de détection,

Les paramètres supposés constants sont :

- La fréquence d'échantillonnage,
- Le gain,
- Les paramètres intrinsèques des géophones.

CARTES DE SENSIBILITÉ THÉORIQUE DE DÉTECTION

Les cartes de sensibilité sont établies en section E-W et montrent l'évolution de la sensibilité exprimée en magnitude. Les cartes sont représentées par année afin de déterminer une évolution de la sensibilité de détection du réseau de surveillance.



Conclusion :

Pendant la période de 2007 à 2012, la sensibilité de détection n'a pas beaucoup évolué ces six dernières années malgré une configuration différente entre la Sonde SAS et l'antenne SQUID™. En effet, seule une voie est mise en détection avec un niveau de bruit presque constant à la même profondeur soit - 560 m. La sensibilité s'est néanmoins améliorée de 0.2 point de magnitude depuis la sonde SAS à l'antenne SQUID™ et après la mise sous batterie de l'acquisition.

Du 20/12/2011 au 25/01/2012, la voie Z de la sonde SQUID™ à -560m est mise hors détection. La voie X du capteur à -400 m, remplace cette dernière, par conséquent, nous observons une légère détérioration avec de la sensibilité théorique de détection. En effet, à la profondeur de 4000 m, nous diminuons de l'ordre de 0.1 à 0.2 point de magnitude.

ANNEXE 7 : BILAN DU FONCTIONNEMENT

LES INDICATEURS DE FONCTIONNEMENT

De façon à être plus explicite sur le fonctionnement de l'auscultation micro sismique, trois indicateurs sont définis :

1. Réseau = Caractérisation du réseau utilisé

Réseau (%) = nombre de voies utilisées / nombre de voies possibles

Le réseau est :

- nominal si *Réseau* = 100 %
- dégradé si *Réseau* < 100 %

2. Auscultation = Taux de fonctionnement du système d'acquisition

Ausc (%) = temps pendant lequel le système d'acquisition a fonctionné avec au moins un capteur tri-axe / temps total

L'auscultation est :

- nominale si *Ausc* = 100 %
- dégradée si *Ausc* < 100 %

3. Sensibilité = Caractérisation de la sensibilité par rapport à une sensibilité de référence

Une seule voie étant suffisante pour détecter un événement, la variation de sensibilité est a priori calculée sur la voie la plus sensible (en l'occurrence, la voie Z des sondes, notamment celle située à 560m de profondeur pour l'antenne SQUIDTM). La période de référence est l'année n-1.

La variation de sensibilité est caractérisée en dB :

Variation = 20 log (Max de bruit voie en détection durant la période concernée / niveau de bruit référence)

La sensibilité est :

- inchangée si *Variation* [-3dB ; +3dB]
- améliorée si *Variation* < -3dB
- dégradée si *Variation* > +3dB

SUIVI DE FONCTIONNEMENT

Bilan du 01/01/2007 au 31/12/2012:

| | Réseau | Auscultation | Sensibilité |
|---|--|---|---|
| 2007 | Réseau SAS : Nominale : 100 % 3 voies validées / 3 | Dégradée : 97.8 % Du 15/01 au 15/07. Report des arrêts du système ci-dessous | Inchangée Variation inférieure à -1 dB |
| | Réseau SQUID™ : Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 | | Nominale : 100 % Du 15/12 au 31/12/07 |
| 2008 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 Pas de signal sismique sur les voies M4_L0X et M4_L0Y (SQUID™ 1) | Nominale : 100 % | Inchangée Variation inférieure à -1 dB |
| 2009 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 Pas de signal sismique sur les voies M4_L0X et M4_L0Y (SQUID™ 1) | Dégradée : 98.4 % Report des arrêts du système ci-dessous | Inchangée Variation inférieure à -1 dB |
| 2010 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 Pas de signal sismique sur les voies M4_L0X et M4_L0Y (SQUID™ 1) | Dégradée : 99.4 % Report des arrêts du système ci-dessous | Inchangée Variation inférieure à -1 dB |
| 2011 | Dégradée : 83.3% 10 voies validées /12 75% depuis le 12/06/11 9 voies validées /12 66% du 20/12 au 31/12 8 voies validées /12 Pas de signal sismique sur les voies M4_L0X et M4_L0Y (SQUID 1) puis la voie M3_L0Z (SQUID™ 2). Défaut temporaire le 20/12 sur la voie M4_L0Z (SQUID™ 1) | Nominale : 100 % | Améliorée Variation +2.5 dB |
| | | | Dégradée Variation de -3.5 dB du 20/12 au 31/12 |
| 2012 | Dégradée : 66% du 01/01 au 25/01 8 voies validées /12 75% depuis le 25/01 9 voies validées /12 | Dégradée : 98.7% (moyenne sur l'année) | Dégradée Variation de -3.5 dB du 01/01 au 25/01 |
| Défaut temporaire jusqu'au 25/01 sur la voie M4_L0Z (SQUID™ 1). Pas de signal sismique sur les voies M4_L0X et M4_L0Y (SQUID 1) puis la voie M3_L0Z (SQUID™ 2) | Inchangée Variation inférieure à -1 dB depuis 2011 | | |

– **Périodes d'arrêt du réseau microsismique de LACQ**

| Période | % de fonctionnement | Origines des arrêts du système d'acquisition de Lacq |
|----------------------|---------------------|--|
| Avril 2007 | 97.8 | 28h d'arrêts du 17/04 au 18/04, cause coupures d'électricité suite à de violents orages. |
| Juin 2007 | 88.5 | 58h d'arrêts du 05/06 au 08/06. Alimentation du PC hors service. Renvoi et changement du matériel défectueux. |
| Août 2009 | 83.5 | Détections continues du 12/08 au 16/08 et le 19/08 qui ont saturé le disk du Pc Omni, provoquant la perte totale des données pendant cette période (120 heures d'arrêt cumulé) |
| Novembre 2009 | 96.6 | Dysfonctionnement du Pc Omni (perte de configuration) induisant une perte totale des données le 21/11/2009 (24 heures d'arrêt cumulé). |
| Avril 2010 | 93.3 | Arrêt du système suite à un défaut d'alimentation de la station du 14/04 au 16/04 (24 heures d'arrêt cumulé). |
| Mars 2012 | 97.2 | Défaut du système d'acquisition sismique : pas de données enregistrées sur le disque dur de la station du 23/03 à 07h40 (TU) au 24/03 à 04h50 (TU), soit 21 heures d'arrêt : Raison inconnue |
| Avril 2012 | 98.4 | Défaut du système d'acquisition sismique : pas de données enregistrées sur le disque dur de la station du 13/04 à 18h30 (TU) au 14/04 à 06h40 (TU), soit 12 heures d'arrêt : Raison inconnue |
| Août 2012 | 98.7 | Blocage PC OMNI sur de vieilles requêtes le 24/08 vers 17h (TU). Le système a été remis en service le 27/08 à 06h (TU). Les données entre le 24/08 à 17h30 TU et le 25/08 à 03h00 TU ont été perdues du fait que les données aient été effacées. On considère donc que le système n'a pas fonctionné pendant cette période |
| Décembre 2012 | 90.2 | Maintenance des télécommunications sur le site de Lacq le 23/12/2012 entraînant une coupure de communication avec la station d'acquisition. Le système a été remis en service le 26/12 à 14h (TU). Les données entre le 23/12 à 13h00 TU et le 26/12 à 14h00 TU ont été perdues du fait que les données aient été effacées : les données les plus anciennes sont effacées, le disque dur ayant une autonomie de moins de 24h suite au nombre très important de détections. On considère donc que le système n'a pas fonctionné pendant cette période |

ANNEXE 8 : CALCUL DE LA MAGNITUDE

- Méthode employée pour le calcul de la magnitude :

- Les magnitudes présentées sont calculées de moment sismique (Modèle de Brune) :

$$M_0 = \frac{4\pi\rho_0 c^3 r \Omega_0}{R}$$

Dont les principaux éléments sont la vitesse des ondes S (c), la distance source-capteur (r) et la valeur plateau Ω_0 , amplitude du spectre de déplacement associé à la fréquence coin.

La densité $\rho_0 = 2.4$ et le coefficient $R = 0.83$.

La valeur plateau est calculée automatiquement à partir de la formule de Snoke basée sur l'intégrale des spectres de vitesse et de déplacement calculés sur l'onde S.

Fenêtre temporelle = pointé S jusqu'à $S/B = 2$

Fenêtre fréquentiel de calcul des intégrales = Fréquence du capteur à Fréquence Nyquist / 2

La magnitude est ensuite calculée à partir de la formule empirique suivante (Hanks and Kanamori) :

$$M_W = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 16.1)$$

- Le calcul de la magnitude est réalisée sur la SQUID3 (-350m) car elle est en trièdre direct, et les ondes S sont mieux identifiées.
- Vitesse des ondes S égale à 2390 m/s (vitesse à la source).
- Incertitude de l'ordre de ± 0.2 .
- La fréquence des capteurs (15 Hz) ne permet pas de calculer les magnitudes des événements de forte énergie (magnitude > 1). On utilise donc soit les magnitudes calculées par les réseaux sismologiques, soit le sismomètre du réseau de Rousse.

Référence :

- Brune, J., 1970, *Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes*, *J. Geophys. Res.*, 75, 26, pp. 4997-5009.
- Hanks, T.C. and H. Kanamori, 1979, *A Moment Magnitude Scale*, *J. Geophys. Res.*, 84, B5, 2348-2350.
- Snoke, J.A., 1987, *Stable determination of (Brune) stress drops*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77, 2, pp. 530-538.

ANNEXE 9: PROCEDURE DE SUIVI – ANTENNE SQUID™

L'antenne SQUID™ est reliée à une station d'acquisition sismique Kephren (synchronisée par GPS) qui transfère toutes les données enregistrées via internet (ligne ADSL dédiée) sur un Ordinateur, PC OMNI à Magnitude.

Rappel : la station d'acquisition est donc accessible à une adresse http.

PC OMNI

PC OMNI permet la gestion de réseaux de stations Kephren. Ses fonctions sont très vastes, s'étendant du paramétrage à distance des stations Kephren en acquisition, à la visualisation des sismogrammes en temps réel.

Les interfaces permettant le contrôle d'OMNI sont accessibles sur un serveur internet.

PC OMNI permet :

- **La supervision de l'ensemble du réseau microsismique**

PC OMNI assure le contrôle du fonctionnement général de la station Kephren en acquisition. Il permet également de suivre l'évolution temporelle de paramètres intrinsèques à la station (tels que l'état des batteries d'alimentation, la synchronisation GPS, les capacités de stockage), mais aussi des paramètres liés à la qualité des signaux enregistrés (niveau de bruit).

En cas de dysfonctionnement du système ou de valeurs anormales des paramètres, PC OMNI émet des messages d'alerte (visuel avec interfaces colorées en rouge, et envoi de mails) et fournit toutes les informations nécessaires pour identifier rapidement l'origine du problème.

- **La gestion et le traitement des données enregistrées**

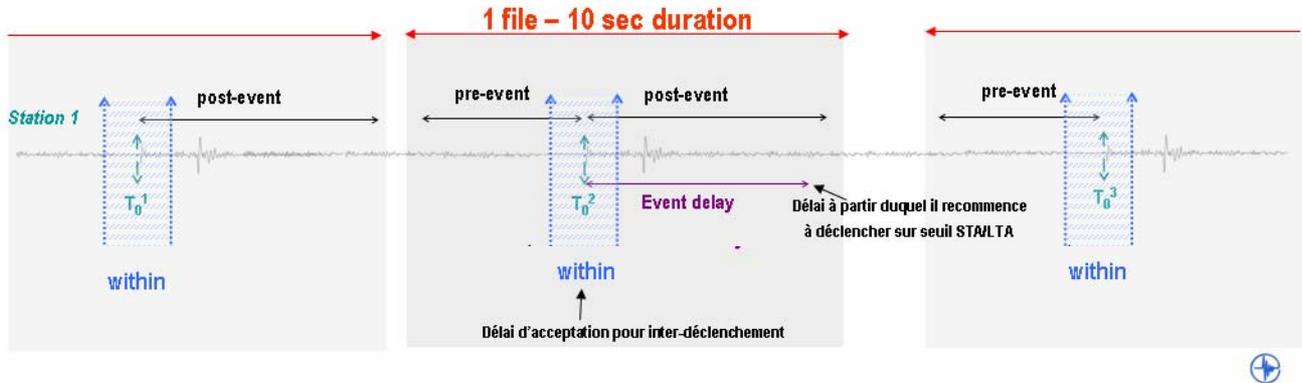
PC OMNI centralise les données : il gère le rapatriement automatique des données enregistrées sur la station Kephren en acquisition sur le site.

- **La configuration du système d'acquisition**

PC OMNI permet un paramétrage complet de l'acquisition (seuils de détection, amplification du signal, échantillonnage, etc...). Ainsi, à tout moment, les paramètres d'acquisition sont modifiables.

PC OMNI génère un fichier trigger.synth qui est la synthèse des événements à rapatrier pour lesquels la station a déclenché :

Exemple d'événements satisfaisant les critères de déclenchement de rapatriement



Différents critères sont paramétrables pour valider une détection et permettre d'obtenir les signaux enregistrés (intégralité du signal notamment).

- T_0 est le moment où le système d'acquisition déclenche une détection sur seuil STA / LTA.
- **Pre-event** est la période temporelle enregistrée avant le déclenchement effectif de l'acquisition
- **Post-event** est la période temporelle enregistrée après le déclenchement effectif de l'acquisition
- **Event Delay** est la période temporelle après le déclenchement effectif de l'acquisition à partir de laquelle le système d'acquisition recommence à déclencher une détection sur seuil STA / LTA

Phase 4 : Envoi d'une requête à la station.

Phase 5 : Rapatriement des fichiers sismiques en format titan

Phase 6 : Gestion des données

Création d'un répertoire sur PC OMNI contenant les fichiers sismiques au format titan :
 2 types de déclenchement sont générés :

- « Acquisitions Forcées » : toutes les heures, une détection est déclenchée automatiquement. Le but est de pouvoir faire une analyse de bruit (c'est-à-dire calculer des paramètres caractéristiques sur des enregistrements « sans signal microsismique »). Le but d'une telle analyse est de pouvoir évaluer la sensibilité de détection du réseau de Lacq et de contrôler les éventuelles hausses ou baisses des niveaux de bruit du réseau (contrôle qualité du signal).
- « Déclenchements LA405 » : Sur déclenchement de la sonde de fond SQUID™ 1 voie Z, à -560 m (paramètres à définir).

Ainsi, pour un événement donné, 1 fichier titan est rapatrié sur PC OMNI.

Les fichiers sont ensuite transférés sur un PC dédié au traitement des données de LACQ

TRAITEMENT DES DONNÉES

1- Conversion des données au format seq2

2- Analyse des données

Deux types de détection :

– Acquisitions forcées (1 par heure) :

Elles sont programmées sur la station dans le but de contrôler la qualité des signaux et les niveaux de bruit. Ainsi, différentes valeurs caractéristiques sont calculées qui seront incluses dans un contrôle qualité du bruit (**NoiseQc**).

– Détections sur dépassement de seuil STA/LTA :

Suivant l'importance du nombre de détections un tri automatique des données (**Seiscreen**) sera effectué dans le but de sélectionner les potentiels événements microsismiques. Une revue manuelle des événements sélectionnés ainsi que les potentielles localisations d'événements seront effectués par la suite.

3- Emission d'un rapport

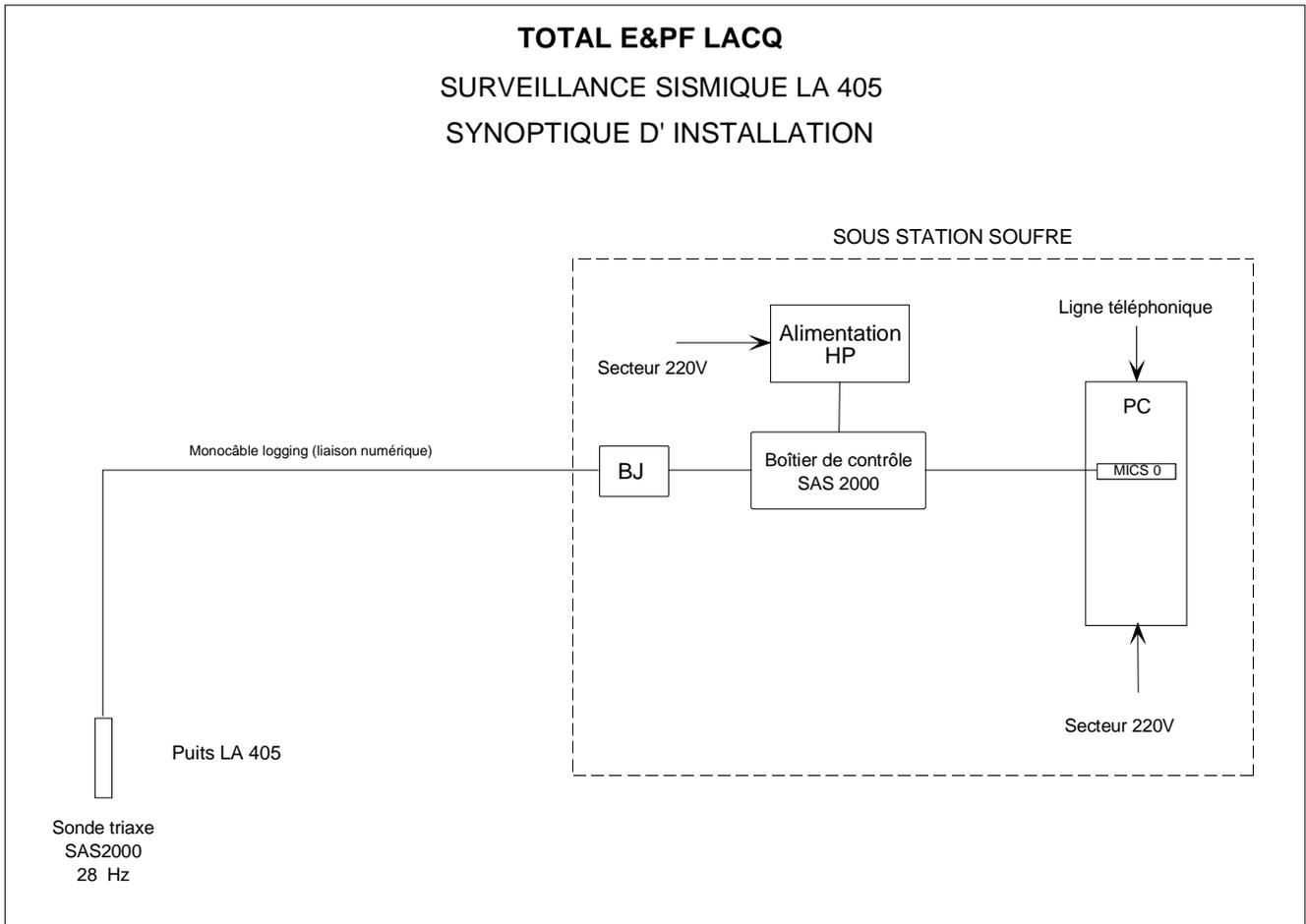
4- Web Monitoring

Mise en place d'un site internet dédié au suivi microsismique de Lacq (accès sécurisé) dès le 01 juin 2009. Le site internet sera actualisé quotidiennement.

- Rapports et documents en ligne,
- Etat de fonctionnement du système,
- Etat de la sismicité,
- Cartes de localisation,
- Modules Google Earth interactifs,
- Aide en ligne

ANNEXE 10 : SYNOPTIQUE DU RESEAU POUR LE SITE DE LACQ

SYNOPTIQUE D'INSTALLATION POUR LA SONDE SAS



SYNOPTIQUE DE L'INSTALLATION DANS L'ARMOIRE SISMIQUE POUR L'ANTENNE DE FOND SQUID™ INSTALLÉE EN DÉCEMBRE 2007

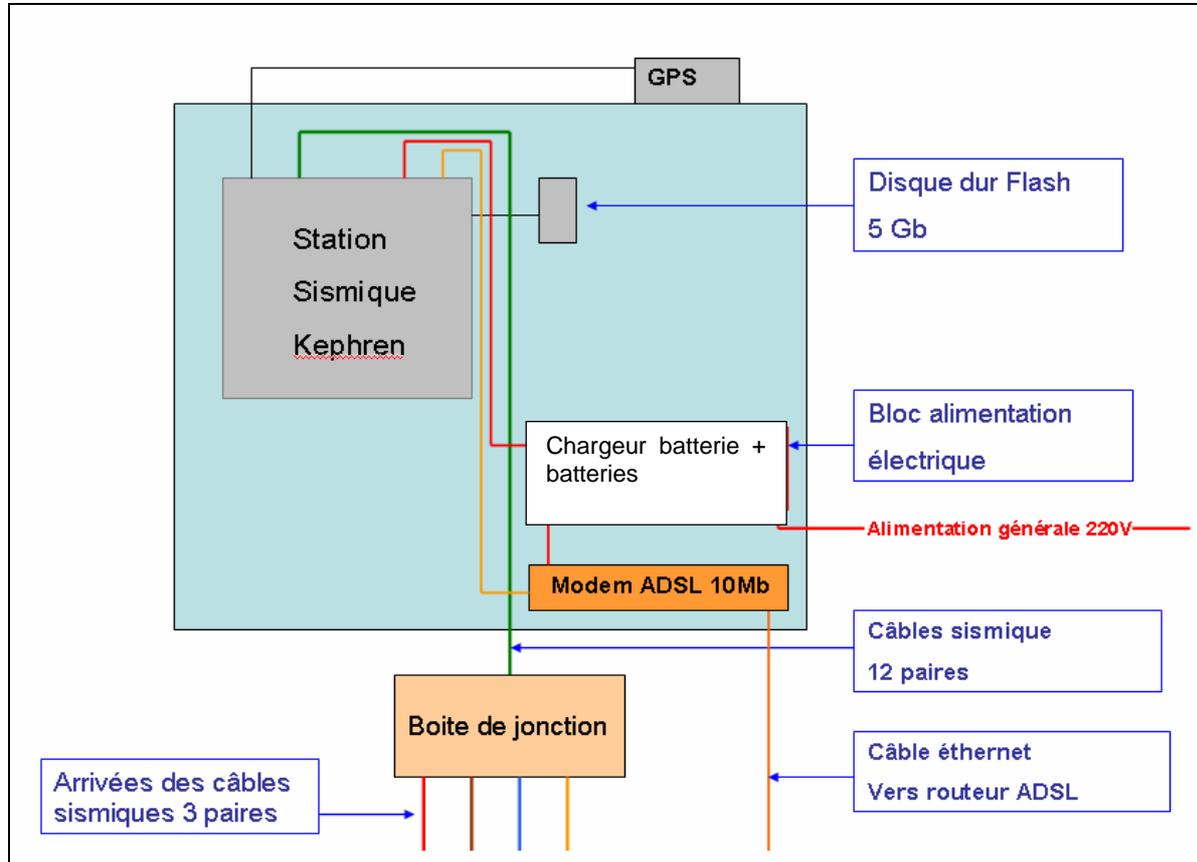


Figure 19 - Synoptique de l'installation dans l'armoire sismique pour l'antenne Multi-niveaux SQUID™

Magnitude SAS

Centre Regain

Route de Marseille

04220 Sainte - Tulle

France

Phone: +33 4 92 79 41 20

Fax: +33 4 92 79 41 21

www.magnitude-geo.com

ANNEXE 4

RAPPORTS DES ÉTUDES GÉOCHIMIQUES INTERACTIONS FLUIDES-MATRICE



Pau novembre 2011

Exploration & Production

DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-051
Pierre CHIQUET

FRANCE Lacq profond

**Injection d'eaux industrielles dans le
C4000. Modélisations complémentaires
au dossier de demande d'autorisation de
2006. Intégration du transport et
évaluation des effets thermiques.**

*

N° Archives : *

La reproduction partielle ou totale et la diffusion, sans l'autorisation écrite de Total, sont strictement interdites.

Adresses postales

Paris 2, place Jean Millier - La Défense 6 - 92078 Paris La Défense Cedex FRANCE
Pau 64018 - Pau Cedex FRANCE

Téléphone : 33 (0)1 47 44 45 46
Téléphone : 33 (0)5 59 83 40 00

Identification page

| | | | | |
|-----------------------------|---|---|---|---------------|
| Title | : | Injection d'eaux industrielles dans le C4000. Modélisations complémentaires au dossier de demande d'autorisation de 2006. Intégration du transport et évaluation des effets thermiques C4000. Modélisations complémentaires au dossier de demande d'autorisation de 2006. Intégration du transport et évaluation des effets thermiques. | | |
| Author(s) | : | Pierre CHIQUET | | |
| Direction | : | | | |
| Date | : | Pau, Novembre 2011 | | |
| Formal commercial order | : | *RFS 30T11CH890E22 | | |
| Chronological reference | : | Verified by | : | UMBHAUER F. |
| EP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-051 | : | Validated by | : | *NAVARRE J.C. |
| N° Archives | : | * | | |



| | | | |
|--------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| Domain (general topics) : | 1 - *Reservoir | 2 - *Géochimie | 3 - * |
| Keywords (specific topics) : | 1 - *Lacq | 2 - *Crétacé 4000 | 3 - *Effluents industriels |
| | 4 - * | 5 - * | 6 - * |
| Country ⁽¹⁾ : | *France | Field ⁽¹⁾ : | *Lacq Profond |
| Region ⁽¹⁾ : | *Aquitaine | Well ⁽¹⁾ : | *LA102, LA109 |
| Basin ⁽¹⁾ : | *Aquitain | Geophysical Survey ⁽¹⁾ : | * |
| Licence/Block ⁽¹⁾ : | * | ⁽¹⁾ several names, if necessary | |
| Comments (free description) : | | | |

Distribution list

| | | |
|--|------------------|---|
| Distribution of complete report | | |
| | DGEP/GSR/ASI/GDM | (Archives) |
| 1 ex | DEV/GIS/EN&FR&IT | AVILA Daniel 1 ex papier + 1 CD avec fichiers de simulation |
| 1 ex | ECA/TEPF/DG/SPG | GAZANIOL Didier |
| 1 ex | ECA/TEPF/SOBEGI | LE MOAL Guy |
| 1 ex | EXPLO/TE/ISS/RGM | UMBHAUER François |
| 1 ex | SCR/RD/MGR | PRINET Catherine |
| 1 ex | DEV/GIS/CO2STK | THIBEAU Sylvain |
| Copies of reduce report | | |
| *1 copy | EP/EXPLO/TE | BITOUN G. / COUTRIX H. |
| 1 copy | EP/EXPLO/TE/ISS | NAVARRE J.C. / SORRIAUX P. |

Résumé/Conclusion

Cette étude a été initiée suite à l'expertise du BRGM (rapport 57226-FR) concernant le dossier de demande d'injection des effluents d'Arkema Mont dans le dispositif C4000.

Cependant, suite à la volonté de réduction de la quantité des effluents injectés dans ce dispositif, cette demande n'est aujourd'hui plus d'actualité.

Cette étude considère donc les fluides injectés dans le dispositif C4000 dans sa configuration actuelle, c'est-à-dire les eaux de la SOBEGI, les eaux de la plateforme industrielle de Lacq (PILA) et les eaux de production du gisement de Lacq profond (LAP). Deux configurations ont été testées :

- Les eaux de la SOBEGI seules
- Le mélange LAP+PILA+SOBEGI

Les modélisations géochimiques intègrent une dimension transport afin de mieux caractériser la spatialisation des effets de dissolution/précipitation. L'impact du thermique sur les conversions géochimiques a également été étudié. En effet, la température d'injection, estimée à 50°C, a vraisemblablement provoqué un refroidissement de la formation, initialement égale à 140°C en fond de puits.

Une première étape a consisté à reprendre, avec le simulateur CHESS, le modèle géochimique de 2006 (Berger 2006). Une simulation 0D, dans laquelle le calcaire à algues est mis en contact à 140°C avec un volume poreux d'effluent LAP+PILA+MONT, montre que les résultats obtenus sont comparables à ceux du code EQ3/6 utilisé en 2006.

Ce point valide l'emploi du code CHESS/HYTEC et de sa base de données dans la suite de l'étude.

En préalable aux simulations chimie/transport 1D, nous avons évalué l'impact de la température d'injection (50°C), sur la température de la formation. Le logiciel réservoir GEM a été choisi pour ses fonctionnalités en transfert de chaleur. Les résultats indiquent que la région où s'établit l'écoulement atteint en quelques mois, donc très rapidement, la température d'injection.

Les simulations chimie-transport à 50°C ont été réalisées avec le code HYTEC. Les effluents injectés correspondent aux schémas d'injection actuels (figure 1). La géométrie prise en compte ne représente pas l'intégralité du réservoir, mais uniquement une zone restreinte sous forme d'un couloir drainant l'essentiel du flux. L'espace considéré est une zone broyée de section 1x5 m traversant 100 m de calcaire à algues puis 100 m de dolomie de Mano. Les modifications de porosité présentées se rapportent à cette zone particulière. A l'échelle du réservoir, ces modifications sont largement pondérées par les faciès matriciels pas ou peu atteints par l'effluent.

Les calculs convergent vers une augmentation homogène de la porosité dans le calcaire à algues. Initialement égale à 7.5%, cette dernière atteint après 40 ans d'injection, 8.4% pour l'effluent SOBEGI seul et 8.3% pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI. Cet effet est essentiellement attribuable à une légère dissolution de calcite qui est le minéral dominant dans le calcaire à algues.

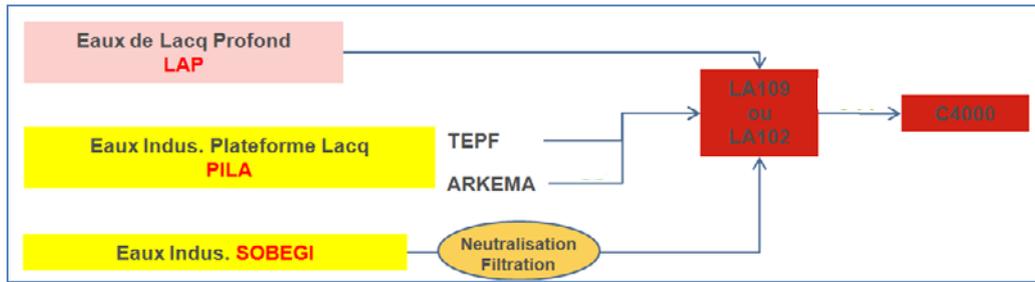


Figure 1 : Schéma d'injection. Origine TEPF.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1 Construction des eaux | 2 |
| 1.1 Hypothèses..... | 2 |
| 1.2 Résultats..... | 4 |
| 2 Comparaison avec le modèle batch de l'étude 2006 | 6 |
| 2.1 Système..... | 6 |
| 2.2 Résultats/Comparaison avec l'étude 2006..... | 6 |
| 3 Construction du modèle 1D | 10 |
| 3.1 Géométrie..... | 10 |
| 3.2 Compositions minéralogiques et cinétiques chimiques..... | 12 |
| 3.3 Modélisation des variations de porosité..... | 13 |
| 3.4 Eaux et débits..... | 13 |
| 4 Résultats | 15 |
| 4.1 Profil de température sans prise en compte de la chimie..... | 15 |
| 4.2 Réactivité de la formation à 50°C..... | 16 |
| 5 Discussion | 20 |
| 5.1 Bilan des simulations chimie-transport..... | 20 |
| 5.2 Commentaires sur l'approche 1D adoptée..... | 21 |
| 5.3 Etudes de sensibilité..... | 22 |
| 6 Références | 24 |
| 7 Annexes – Spéciation des eaux aux conditions labo et mélanges aux conditions fond | 25 |
| Liste des Figures..... | 32 |
| Liste des Tableaux..... | 33 |
| Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude..... | 34 |

1 Construction des eaux

1.1 Hypothèses

1.1.1 Origine des analyses

Les données nécessaires aux calculs de spéciation des eaux de Lacq profond (LAP) et de la plateforme industrielle de Lacq (PILA) sont tirées de la note ACO 05.193 de Commarieu (2005). L'étape de validation entre le modèle EQ3/6 de 2006 et le modèle actuel CHESS/HYTEC inclut les eaux d'Arkema Mont dont la composition est également précisée dans Commarieu (2005).

L'eau de la SOBEGI a été calculée à partir d'analyses s'échelonnant de janvier 2002 à décembre 2006. Ces données sont tirées du document « BILAN INJECTION C4000 - 2002-2006-lv.xls » fourni par TEPF.

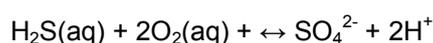
1.1.2 Base de données géochimiques

La spéciation des eaux et de leurs mélanges, aux conditions laboratoire et aux conditions fond ont été évaluées avec le logiciel de spéciation CHESS et la base de données eq36.tdb. Le modèle d'activité choisi pour tenir compte de la non-idéalité de la solution est celui du B-dot.

Les équilibres redox ne sont pas pris en compte. En effet, quelle que soit l'eau considérée, il n'est pas possible d'unifier les différentes espèces redox autour d'un même potentiel. Par exemple, pour l'effluent LAP à 22°C et à pH 5.8, l'équilibre $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ impose un potentiel redox $E_h = 0.443\text{V}$. Dans ces conditions, le même équilibre thermodynamique appliqué aux espèces du soufre indique que SO_4^{2-} est largement majoritaire par rapport aux autres espèces (sulfures, sulfites et thiosulfates). Ce point est contredit par l'analyse de l'eau où $[\text{HS}^-]_{\text{total}} = 715 \text{ ppm}$, $[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{total}} = 9 \text{ mg/l}$, $[\text{SO}_2]_{\text{total}} = 6 \text{ mg/l}$ et $[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]_{\text{total}} = 23 \text{ mg/l}$.

Les simulations ont donc été réalisées en supprimant les réactions entre espèces de degré d'oxydation différent tout en conservant les réactions acido-basiques ou réactions de complexation.

Par exemple la réaction



est supprimée, mais les réactions



sont conservées.

1.1.3 Prise en compte de la fraction organique

Comme dans l'étude de Berger (2006), la fraction organique de l'eau d'Arkema Mont a été complétée à partir du rapport de Devaux et Bourda (2004).

- Le 12-aminododécanoate de sodium $\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_{11}-\text{COONa}$ est modélisé par l'acide 11-aminoundécanoïque $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$, noté AdH dans la suite de l'étude.
- Le dodécanedioate de disodium $\text{NaOOC}-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COONa}$ est modélisé par l'acide dodecanedioïque $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$, noté H₂Do dans la suite de l'étude.

Les autres espèces organiques prises en compte sont :

- Les espèces dérivées de l'acide acétique, $\text{H}_3\text{C}-\text{COOH}$, noté AcH(aq) (base conjuguée Ac⁻)

- Les espèces dérivées de l'ion oxalate, OOC-COO^- , noté Ox^{2-} (acide conjugué HOx)

Nous avons réutilisé les constantes d'équilibre de complexation de H^+ , Fe^{2+} , Mg^{2+} et Ca^{2+} avec les groupements carboxyles des espèces Ac^- , Ox^{2-} , Ad^- et Do^{2-} telles que définies dans le travail de G. Berger (2006). Ces données, ainsi que les références utilisées, sont compilées en table 1.

Le lactame 12, le toluène et le cyclohexane, n'ont pas été conservés car leur réactivité est essentiellement liée à des processus redox (non pris en compte dans cette étude). De plus, suite à la mise en place d'un dispositif de séparation, les eaux de Mont sont maintenant très faiblement concentrées en lactame 12.

1.1.4 Méthode de calcul des eaux à l'initial

Aucun minéral n'est autorisé à la précipitation dans ces calculs. Le §2.2 précise qu'il s'agit d'une hypothèse conservatrice qui revient à maximiser la réactivité en générale dans le réservoir et le risque de colmatage en particulier.

Dans les calculs de spéciation des eaux initiales, les espèces aqueuses dosées en laboratoire sont déclarée en « total » c'est-à-dire de façon indifférenciée entre acide/base conjuguée ou ion/complexe. Par exemple :

- les chlorures dosés correspondent à la somme de $\text{Cl}^- + \text{MgCl}^+ + \text{CaCl}^+ + \text{KCl}(\text{aq}) + \dots$
- les sulfates correspondent à la somme de $\text{SO}_4^{2-} + \text{HSO}_4^- + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) + \text{CaSO}_4(\text{aq}) + \dots$

La répartition entre espèces de la même famille est la résultante du calcul du pH et de l'activité des espèces aqueuses.

Lorsque cela est possible, l'électroneutralité des eaux aux conditions ambiantes est ajustée en modifiant la concentration d'une espèce aqueuse peu ou pas réactive comme Na^+ ou Cl^- .

Nous proposons 2 calculs pour la spéciation de l'eau de Mont à 20.5°C. Le premier calcul reprend le pH mesuré en laboratoire et ne modifie que la charge en ions Na^+ pour respecter l'électroneutralité. Dans ce cas (voir annexes) l'alcalinité simulée est faible par rapport à l'alcalinité expérimentale. La seule espèce suffisamment représentée pour remonter l'alcalinité étant l'ion OH^- , nous avons dans un second calcul augmenté le pH de 12.85 à 13.5 pour retrouver une alcalinité correcte. Les eaux et mélange issus de l'effluent de Mont avec et sans correction de l'alcalinité portent respectivement l'appellation « avec (resp. sans) correction alcalinité/pH ».

| Réaction | logK @ 140°C | logK @ 50°C |
|--|--------------|-------------|
| $\text{HOx} \leftrightarrow \text{Ox}^{2-} + \text{H}^+$ | -5.16 | -4.44 |
| $\text{CaOx} \leftrightarrow \text{Ox}^{2-} + \text{Ca}^{2+}$ | -3.98 | -3.21 |
| $\text{FeOx} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Ox}^{2-}$ | -5.03 | -7.70 |
| $\text{MgOx} \leftrightarrow \text{Ox}^{2-} + \text{Mg}^{2+}$ | -4.42 | -3.65 |
| $\text{H}_2\text{Ox} \leftrightarrow \text{Ox}^{2-} + 2\text{H}^+$ | -6.14 | -5.17 |
| $\text{AlOx} \leftrightarrow \text{Ox}^{2-} + \text{Al}^{3+}$ | -14.69 | -8.75 |
| $\text{CaDo(aq)} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Do}^{2-}$ | -3.98 | -3.21 |
| $\text{FeDo(aq)} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Do}^{2-}$ | -5.03 | -4.26 |
| $\text{MgDo(aq)} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{Do}^{2-}$ | -4.41 | -3.65 |
| $\text{H}_2\text{Do(aq)} \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{Do}^{2-}$ | -6.14 | -5.17 |
| $\text{HDo} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{Do}^{2-}$ | -5.16 | -4.44 |
| $\text{AcH(aq)} \leftrightarrow \text{Ac}^- + \text{H}^+$ | -5.15 | -4.79 |
| $\text{CaAc}^+ + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{AcH(aq)}$ | 3.42 | 3.77 |
| $\text{FeAc}^+ + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{AcH(aq)}$ | 3.33 | 3.48 |
| $\text{MgAc}^+ + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{AcH(aq)}$ | 3.56 | 3.55 |
| $\text{CaAd}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Ad}^-$ | -1.58 | -1.27 |
| $\text{FeAd}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Ad}^-$ | -1.92 | -1.11 |
| $\text{MgAd}^+ \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{Ad}^-$ | -2.12 | -1.46 |
| $\text{HAd(aq)} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{Ad}^-$ | -5.23 | -4.79 |

(1) Harrison & Thyne (1992); (2) Analogie avec Ox^{2-} dans Harison & Thyne (1992)

(3) Base de données eq36.tdb; (4) Analogie avec Ac^- dans Harison & Thyne (1992)

Tableau 1 : Liste des réactions impliquant les espèces Ac^- , Ox^{2-} , Ad^- et Do^{2-} et constantes d'équilibre utilisées.

1.2 Résultats

Le détail des eaux, aux conditions laboratoire et aux conditions fond, est détaillé en annexes.

1.2.1 Eaux aux conditions surface

Nous rejoignons les observations de G. Berger (2006) concernant la sursaturation en sulfures de fer (pyrite (FeS_2), pyrrhotite, troilite (FeS)) des eaux LAP, PILA et SOBEGI aux conditions surface. Il est vraisemblable qu'une partie du fer dosé en laboratoire se présentait sous une forme colloïdale plutôt que réellement dissoute.

D'autres minéraux sont également sursaturés aux conditions surface :

- La mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ dans les eaux de MONT
- La brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dans les eaux de PILA
- L'hydroxylapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ et la whitlockite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2$ dans les eaux SOBEGI et PILA.

1.2.2 Mélanges aux conditions fond

La composition des mélanges à été calculée à 50°C. Comme démontré au § 5.1, cette valeur correspond à la température de la zone traversée par les effluents. Les espèces sursaturées sont :

- les sulfures de fer (pyrite, pyrrhotite, troilite), dans SOBEGI, LAP+PILA+SOBEGI et LAP+PILA+MONT.
- Les phosphates de calcium (hydroxylapatite et whitlockite) dans SOBEGI, LAP+PILA+SOBEGI et LAP+PILA+MONT. On note des valeurs remarquablement élevées pour le SI de l'hydroxylapatite dans les mélanges LAP+PILA+MONT à 50 et 140°C.
- La brucite et deux oxydes de fer (FeO et $\text{Fe}(\text{OH})_2$) dans LAP+PILA+SOBEGI.

Dans l'hypothèse pessimiste où les systèmes d'injection ne sont pas pourvus de dispositifs destinés à séparer les phases solides (suspensions, colloïdes), les simulations décrites plus bas n'autorisent la précipitation des minéraux sursaturés qu'une fois les effluents entrés dans le réservoir. Il s'agit là d'un choix conservatif car il majore les risques de colmatage du proche puits.

2 Comparaison avec le modèle batch de l'étude 2006

G. Berger (2006) a étudié le comportement en batch du calcaire à algues suite à l'injection à 140°C du mélange LAP+PILA+MONT. Nous reprenons cet exercice afin d'évaluer la cohérence du modèle actuel avec l'étude antérieure. Précisons également que ce mélange n'est plus envisagé dans les opérations C4000 et qu'il n'est étudié que pour comparer les simulateurs CHESS/HYTEC et EQ3/6.

2.1 Système

Le ratio massique initial roche/eau est fixé à 36/1. Dans ces conditions, et avec la minéralogie telle que définie en table 2, la porosité est égale à 7.514%. Cette porosité est assimilée à un réseau de fractures dont les épontes, planes et parallèles, représentent la surface réactive totale à l'initial. Cette surface dépend de l'épaisseur de la fracture (figure 2), fixée à 1 cm dans cette étude. La surface réactive de chaque minéral, toujours à l'initial, est proportionnelle à sa fraction volumique. Par la suite, les surfaces réactives des minéraux évoluent proportionnellement avec leur masse (cm²/g de minéral).

Ce modèle considère donc l'égalité entre la surface géométrique des minéraux exposée au flux et leur surface réactive. Nous précisons dans le § 4.2.3 que cette hypothèse, rarement admise dans la littérature, surestime généralement de plusieurs ordres de grandeurs les cinétiques chimiques.

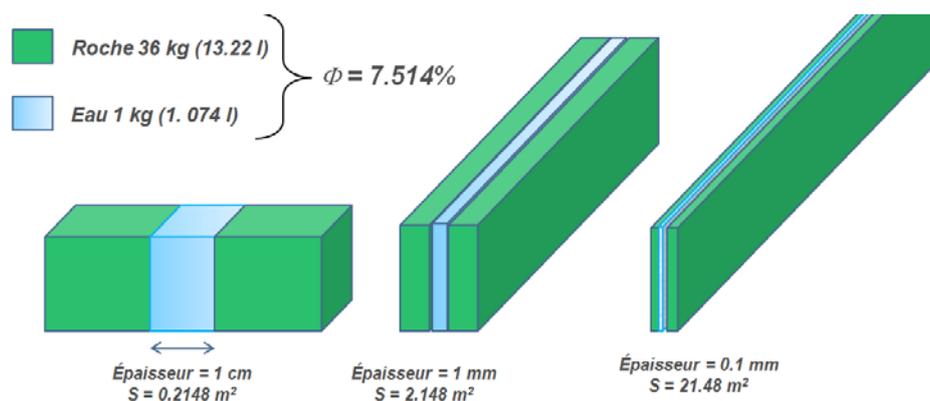


Figure 2 : Représentation du système élémentaire. Pour une même porosité ($\Phi = 7.514\%$), la surface réactive totale initiale est d'autant plus grande que l'épaisseur de la fracture est faible. Dans ce travail, tous les calculs sont réalisés en prenant une épaisseur de 1 cm.

Dans la simulation présentée au § 3.2, la roche est mise en contact à 140°C avec 1 volume poreux d'effluent LAP+PILA+MONT. Aucune pression partielle en gaz n'est imposée, ce qui revient à négliger le rôle tampon des gaz dans le réservoir et à considérer que l'eau injectée balaye instantanément le gaz en place.

Les propriétés cinétiques des minéraux, déduites des hypothèses de G. Berger, sont rappelées en table 2. Les surfaces réactives initiales correspondent à une épaisseur de fracture de 1 cm. Les néominéraux sont supposés précipiter à l'équilibre thermodynamique.

2.2 Résultats/Comparaison avec l'étude 2006

Le suivi de la minéralogie primaire (figure 3) montre :

- Une évolution comparable du quartz et de la dolomite entre l'étude 2006 et l'étude CHESS où l'alcalinité/pH de l'eau de Mont n'ont pas été corrigés. Le cas avec modification de

l'alcalinité/pH donne qualitativement les mêmes tendances, avec cependant des amplitudes plus prononcées.

- Hormis une dissolution initiale instantanée de la calcite, celle-ci demeure inerte dans l'étude 2006. Ce point semble suspect et explique vraisemblablement les différences constatées pour l'anhydrite, qui précipite dans l'étude 2006 et se dissout dans les deux nouvelles simulations.

L'évolution des phases secondaires (figure 4) se présente comme la séquence de trois minéraux dont les domaines de stabilité sont balayés au cours du temps.

- brucite ($Mg(OH)_2$) et Talc ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) précipitent qualitativement de la même manière. Le cas « sans modification de l'alcalinité/pH » donne des amplitudes plus proches de l'étude 2006.
- Le minéral intermédiaire est quant à lui différent : magnetite dans l'étude 2006, chrysotile ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) dans notre étude. L'apparition de magnetite ($Fe^{2+}Fe^{3+}_2O_4$) peut s'expliquer par la présence de fer en solution et par la prise en compte des réactions d'oxydoréduction. Cependant, en suivant l'évolution du potentiel redox avec le temps (figure 5), d'autres espèces comportant du fer, telles que l'hématite ($Fe^{3+}_2O_3$) auraient dû figurer dans la série des néominéraux.

Tout comme dans l'étude 2006, l'équilibre thermodynamique, pour une fracture initiale de 1 cm, est atteint en moins de 5 ans. Les modifications de porosité sont négligeables : Φ passe de 7.5140% à l'initial à 7.5288% avec modification de l'alcalinité/pH et 7.5217% sans modification de l'alcalinité/pH.

Enfin, le pH suit la même tendance avec néanmoins une amplitude un peu plus grande dans les deux nouvelles études.

En conclusion, le modèle thermocinétique de G. Berger (2006) et ceux mis en place dans cette étude conduisent, dans le cas :

- de la réactivité en batch du calcaire à algues à 140°C,
- avec 1 volume poreux d'effluent LAP+PILA+MONT, dans lequel le pH à 20.5°C de l'eau de Mont n'a pas été modifié par rapport à la mesure labo,

à des évolutions qualitativement proches avec néanmoins des différences au niveau du comportement de certains minéraux :

- calcite anormalement stable dans l'étude 2006 impactant sur le comportement de l'anhydrite,
- apparition de magnétite dans l'étude 2006 alors qu'il s'agit de chrysotile dans cette étude.

| | % mass | M | mol/kg d'eau | ρ (kg/m ³) | Volume (l/kg d'eau) | % vol. | S (m ² /kg eau) | S (cm ² /g minéral) | k (mol/cm ² /s) @ 140C |
|-----------|--------|--------|--------------|-----------------------------|---------------------|--------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Calcite | 87 | 100.09 | 312.93 | 2709.89 | 11.558 | 0.8743 | 0.1878 | 0.05997 | 10 ⁻⁷ |
| Dolomite | 6 | 184.40 | 11.71 | 2864.93 | 0.754 | 0.0570 | 0.0123 | 0.05672 | 0.4 10 ⁻⁹ |
| Anhydrite | 3 | 136.14 | 7.93 | 2963.47 | 0.364 | 0.0276 | 0.0059 | 0.05483 | 10 ⁻¹¹ |
| Quartz | 4 | 60.08 | 23.97 | 2648.29 | 0.544 | 0.0411 | 0.0088 | 0.06136 | 5 10 ⁻¹¹ |

Tableau 2 : Propriétés cinétiques des minéraux du calcaire à algues. Hypothèses reprises de l'étude Berger (2006). Les surfaces réactives correspondent aux surfaces géométriques.

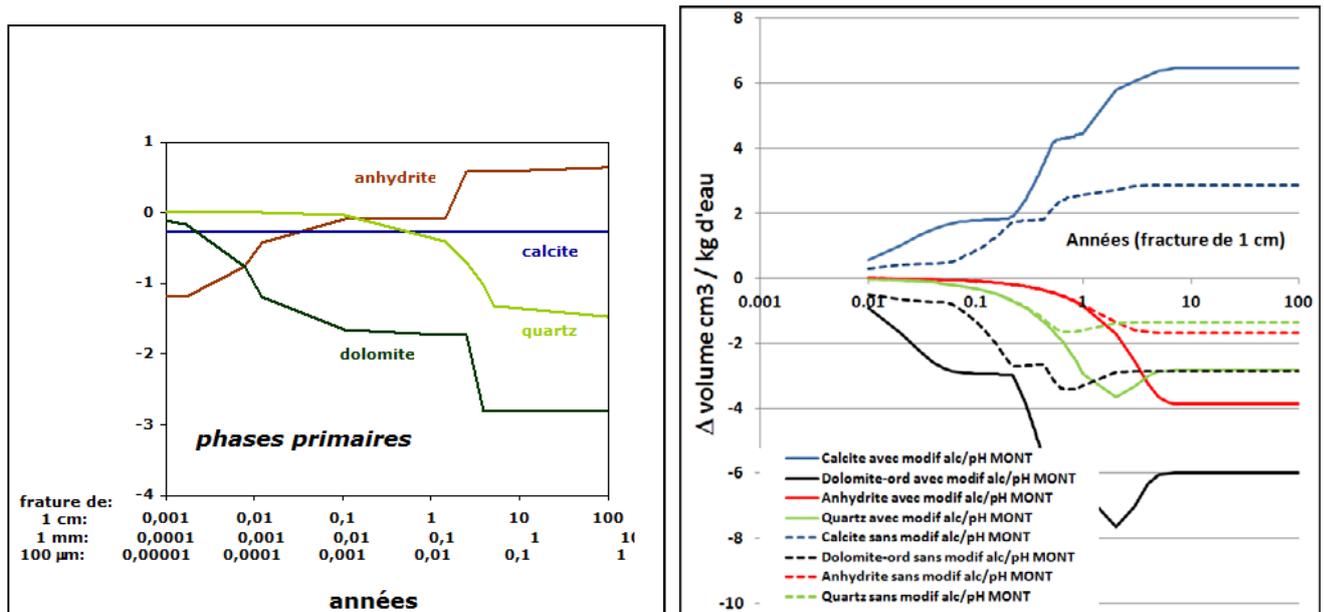


Figure 3 : Suivi de la minéralogie primaire au cours du temps exprimée en variation volumique (Δ cm³/kg d'eau porale). Gauche : étude Berger (2006), droite : cette étude. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C.

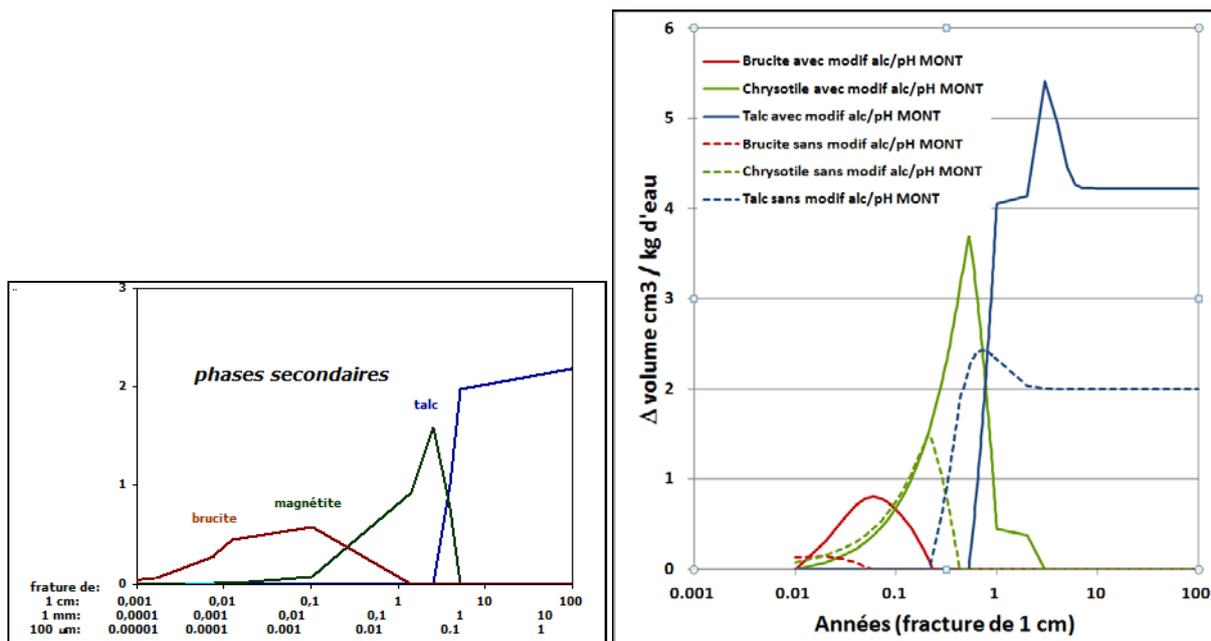


Figure 4 : Suivi de la minéralogie secondaire au cours du temps exprimée en variation volumique (Δ cm³/kg d'eau porale). Gauche : étude Berger (2006) ; droite : cette étude. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C. Ces néominéraux précipitent à l'équilibre thermodynamique.

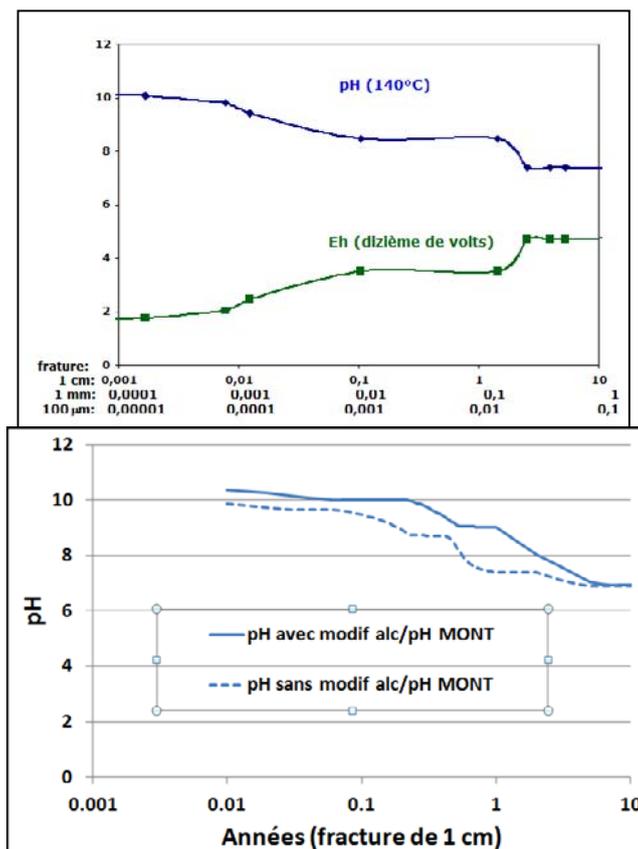


Figure 5 : Evolution du pH au cours du temps. Le potentiel redox Eh n'a pas été calculé dans cette étude (à droite) car les aspects redox n'ont pas été pris en compte. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C.

3 Construction du modèle 1D

Ce chapitre établit les paramètres d'entrée des simulations chimie-transport. Nous définissons la géométrie du système et les propriétés thermocinétiques des minéraux.

3.1 Géométrie

La géométrie choisie (figures 6 et 7) revient à considérer un assemblage du motif élémentaire défini au chapitre précédent le long d'une demi-portion d'espace bornée par le puits injecteur. Ce volume, de section 1 x 5 m, représente une zone broyée qui parcourt 100 m de calcaire à algues puis 100 m de dolomie de Mano.

Les fractures sont supposées parallèles les unes aux autres. En conservant, à l'initial, une porosité $\Phi = 7.514 \%$ et une épaisseur de fracture de 1 cm, le modèle équivaut à un ensemble de :

- 8 bandes de roche d'épaisseur 11.56 cm, de hauteur 5 m et de longueur 200 m,
- séparées par 7.5 fractures de 1 cm d'épaisseur, 5 m de hauteur et 200 de long.

Nous rappelons qu'il s'agit de modélisations 1D dans le sens de l'écoulement. L'assemblage « fracture/bande de roche » n'est pas explicitement traité, mais il s'exprime au travers de la porosité et des surfaces réactives.

Il est d'autre part essentiel de rappeler que le système étudié ne représente qu'une fraction du réservoir : un couloir fracturé où se concentre l'essentiel de l'écoulement car il s'agit de la zone de plus forte perméabilité connectée au puits. Les zones matricielles (non fissurées/fracturées) sont dans leur ensemble préservées du flux injecté.

Les modifications de porosité présentées dans la suite de cette étude sont relatives à cette zone fracturée. Les variations moyennées à l'échelle du réservoir sont plus faibles car le ratio volumique *roche fracturée / roche matricielle* est faible (de l'ordre de 0.01 à 0.05 suivant les zones du réservoir).

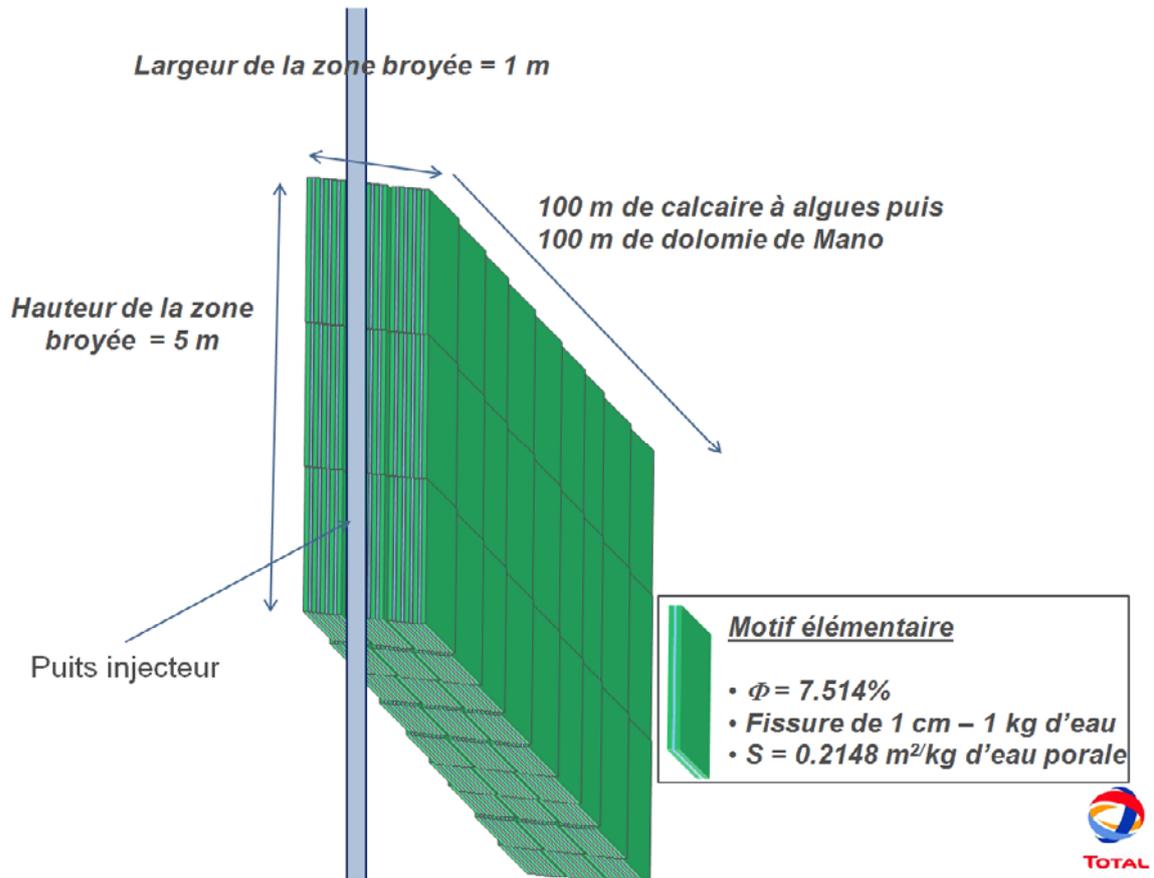


Figure 6 : Interprétation géométrique du système 1D. Vue d'ensemble.

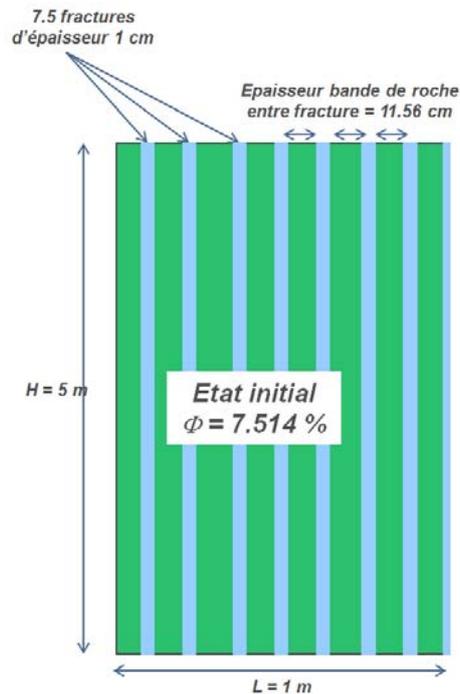


Figure 7 : Interprétation géométrique du système 1D. Section représentant l'alternance fractures/bandes de roche. Ce système n'est pas explicitement modélisé, mais il représente correctement la porosité et la surface réactive totale.

3.2 Compositions minéralogiques et cinétiques chimiques

3.2.1 Minéralogie

La minéralogie de la dolomie de Mano a été construite en inversant les proportions massiques de calcite et de dolomite par rapport au calcaire à algues (étude 2006). La porosité, est la même que dans le calcaire à algues (table 3).

| | Φ (%) | S (m ² /kg d'eau) | $m_{\text{reac}}/m_{\text{eau}}$ | | % mass | mol/kg d'eau | Volume (l/kg d'eau) | % vol. | S (cm ² /kg eau) | S (cm ² /g minéral) |
|------------------------|------------|------------------------------|----------------------------------|-----------|--------|--------------|---------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|
| Calcaire algues | 0.0751 | 0.21482 | 36 | Calcite | 87 | 312.93 | 11.558 | 87.43 | 18.7817 | 0.000600 |
| | | | | Dolomite | 6 | 11.71 | 0.754 | 5.70 | 1.2247 | 0.000567 |
| | | | | Anhydrite | 3 | 7.93 | 0.364 | 2.76 | 0.5922 | 0.000548 |
| | | | | Quartz | 4 | 23.97 | 0.544 | 4.11 | 0.8836 | 0.000614 |
| Dolomie Mano | 0.0751 | 0.21482 | 37.7 | Calcite | 6 | 22.58 | 0.834 | 6.31 | 1.3554 | 0.000600 |
| | | | | Dolomite | 87 | 177.73 | 11.435 | 86.50 | 18.5825 | 0.000567 |
| | | | | Anhydrite | 3 | 8.30 | 0.381 | 2.88 | 0.6197 | 0.000548 |
| | | | | Quartz | 4 | 25.08 | 0.569 | 4.30 | 0.9246 | 0.000614 |

Tableau 3 : Proportions minéralogiques initiales du calcaire à algues et de la dolomite de Mano prises pour les simulations 1D. Les surfaces indiquées sont les surfaces réactives.

3.2.2 Température, constantes d'équilibre et constantes cinétiques

La température est une variable premier ordre à la fois sur les équilibres chimiques et sur les constantes cinétiques. Nous avons donc consacré le chapitre 5.1 à l'étude des gradients de température dans le système 1D mis en place. Ce chapitre indiquant que le profil de température se stabilise très rapidement à la température d'injection (50°C), nous avons paramétré les simulations chimie-transport à cette nouvelle température :

- Les constantes d'équilibre des minéraux à 50°C sont référencées dans la base de données eq36.tdb de CHESS-HYTEC.
- Les constantes cinétiques des 4 minéraux initiaux (calcite, dolomite anhydrite et quartz) ont été recalculées en utilisant la loi d'Arrhénius :

$$k_{323.15} = k_{413.15} \exp \left[\frac{-Ea}{R} \left(\frac{1}{323.15} - \frac{1}{413.15} \right) \right]$$

- $k_{323.15}$ et $k_{413.15}$ sont respectivement les constantes cinétiques des minéraux à 50°C et à 140°C, R la constante des gaz parfaits et Ea l'énergie d'activation des minéraux. Ces dernières valeurs, représentées en table 4, sont issues de la revue d'étude de Palandri & Kharaka (2004). A la différence des simulations batch traitées au § 3.2, ces simulations 1D intègrent une cinétique chimique pour les néominéraux. En effet, il semble plus physique d'inclure ce raffinement car une précipitation n'est jamais instantanée. Pour rester proche de l'étude 2006 dans laquelle les néominéraux précipitaient à l'équilibre à 140°C, nous avons utilisé une constante cinétique $k = 10^{-4} \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ à 140°C. Nous avons ensuite traduit ces valeurs à 50°C comme expliqué au point précédent.

| | k @ 140°C | Ea(*) | k @ 50°C |
|-----------------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | mol/m ² /s | kJ/mol | mol/m ² /s |
| Calcite | 1.00E-05 | 23.5 | 1.49E-06 |
| Dolomite | 4.00E-06 | 95.3 | 1.76E-09 |
| Anhydrite | 1.00E-07 | 14.3 | 3.14E-08 |
| Quartz | 5.00E-07 | 90 | 3.39E-10 |
| Pyrite | 1.00E-04 | 250 | 1.57E-13 |
| Hydroxylapatite | 1.00E-04 | 56.9 | 9.92E-07 |
| Brucite | 1.00E-04 | 42 | 3.32E-06 |
| Chrysotile | 1.00E-04 | 73.5 | 2.58E-07 |
| Ferrosilite(**) | 1.00E-04 | 80 | 1.52E-07 |
| Siderite | 1.00E-04 | 23.5 | 1.49E-05 |
| Talc | 1.00E-04 | 42 | 3.32E-06 |
| Pyrrhotite | 1.00E-04 | 63 | 6.05E-07 |
| Tremolite | 1.00E-04 | 94.4 | 4.74E-08 |

(*) D'après Palandri & Kharaka (2004)

(**) Ea prise comme l'Enstatite (MgSiO₃)

Tableau 4 : Constantes cinétiques à 140°C et 50°C et énergies d'activation.

3.2.3 Surfaces réactives

Les simulations présentées au chapitre 3 mettent en jeu des surfaces réactives égales aux surfaces géométriques des minéraux. Ce choix a été pris dans un souci de cohérence avec l'étude de G. Berger (2006). Il est généralement admis dans la littérature (ex. Bethke, 1996 ; Gaus et al., 2005), qu'il existe, pour des roches naturelles, un facteur 100 à 1000 (voire 10000) entre surfaces géométriques et surfaces réactives en raison d'un manque d'accessibilité (effet de matrice compacte) lié à des problèmes diffusifs ou de passivation.

Dans le chapitre 5.2, nous avons donc divisé par 100 les surfaces géométriques des minéraux initiaux pour obtenir leur surface réactive. Ces valeurs sont indiquées en table 3. Par hypothèse (Berger, 2006) la surface réactive des minéraux étant proportionnelle à leur fraction volumique ($\frac{S_i(m^2)}{V_i(m^3)} = Cte$, $\forall i$ et \forall les quantités de i), nous avons appliqué le même ratio pour les néominéraux.

3.3 Modélisation des variations de porosité

Les porosités présentées dans ce rapport sont recalculées *a posteriori* à partir des modifications minéralogiques. Bien que HYTEC permette théoriquement un couplage minéralogie-porosité-perméabilité, cette option n'a pu être mise en œuvre en raison du coût numérique requis (débits nécessitant des pas de temps très faibles).

Lorsque les variations de porosités sont importantes, cette approximation peut induire des erreurs de simulation. En effet, le temps de passage de l'effluent dans une maille donnée étant proportionnel au volume poreux ($\tau = V/Q$), ce choix minimise, dans le cas d'une dissolution, le temps de contact entre la roche et la solution et par conséquent l'amplitude des réactions. Les fronts de dissolution présentés dans les paragraphes suivants pourraient donc être plus raides, c'est-à-dire comporter une dissolution plus intense sur le bord d'attaque, mais ce, sur une épaisseur plus faible.

3.4 Eaux et débits

Les effluents sont injectés pendant 40 ans à débit constant.

2 Simulations ont été réalisées (table 5) :

- Mélange LAP+PILA+SOBEGI à un débit de 600 m³/j.
- Eau de la SOBEGI seule à 216 m³/j.

| | Eaux Plateforme Indus. Lacq | Eaux prod. Lacq Profond | Eaux indus. |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|
| | PILA | LAP | SOBEGI |
| 600 m ³ /j | 17% | 47% | 36% |
| 216 m ³ /j | / | / | 100% |

Tableau 5 : Mélanges d'effluents et débits traités dans les simulations.

4 Résultats

L'effet de la température d'injection sur le comportement géochimique du réservoir est un des axes d'approfondissement proposé dans la tierce expertise du dossier de demande d'autorisation.

Nous avons traité ce point en 2 étapes :

- § 5.1 : Simulation du refroidissement de la formation avec le logiciel GEM. Cette étape, réalisée sans chimie, indique que la température du réservoir atteint en quelques mois la température d'injection (50°C).
- § 5.2 : Simulations chimie-transport à 50°C.

4.1 Profil de température sans prise en compte de la chimie

Nous avons dans un premier temps cherché à quantifier le refroidissement du réservoir pour une température d'injection de 50°C en dehors des considérations géochimiques.

La géométrie est la même que celle définie au § 4.1 :

- géométrie 1D
- section de 1x5 m et longueur de 200 m
- Porosité, $\phi = 7.5\%$.

La température initiale du réservoir et la température d'injection sont respectivement de 140°C et 50°C. Le débit d'injection est fixé à 600 m³/j (débit majorant).

Les paramètres nécessaires à la résolution du problème thermique :

- capacité calorifique massique et conductivité thermique de la roche et des fluides,
- conditions limites aux frontières du système,

sont tirés de la référence Chiquet (2008) où ils ont été paramétrés pour la Dolomie de Mano au niveau du champ de Rousse.

Ces simulations étant réalisées en mode monophasique aqueux et dans une configuration 1D, le transport de chaleur par remontée de gaz (par exemple pendant les phases d'arrêt), n'est pas pris en compte.

Comme indiqué en figure 8, la formation atteint très rapidement (~ 2 mois) la température d'injection.

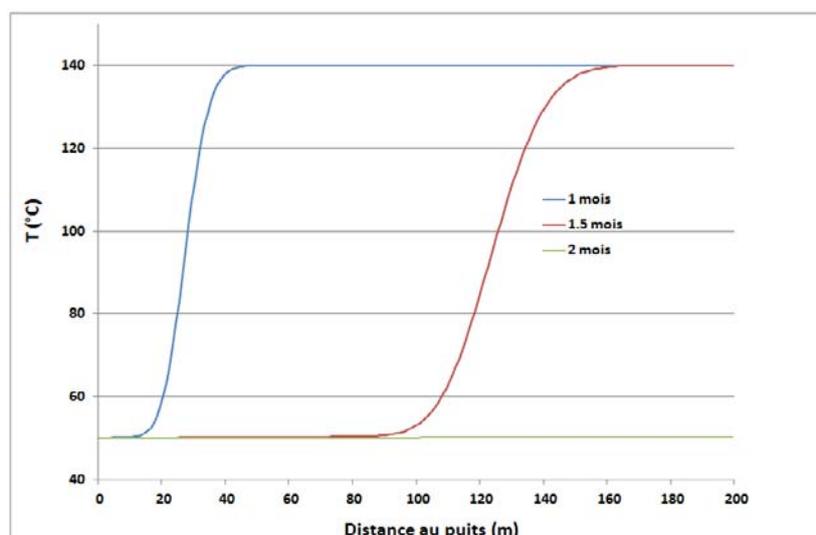


Figure 8 : Profil de température avec l'éloignement au puits à différentes dates. Température initiale du réservoir = 140°C ; température d'injection = 50°C.

4.2 Réactivité de la formation à 50°C

Dans cette partie, le transport est intégré à l'aide de simulations 1D en mode monophasique aqueux. Nous utilisons le simulateur HYTEC (transport) couplé au module CHES (chimie). Les mélanges et débits présentés en table 5 sont traités pour des périodes d'injection de 40 ans. La post-injection est également simulée pendant 10 ans.

4.2.1 Minéraux initiaux

Les mélanges injectés ont des indices de saturation (SI) en calcite (CaCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quartz (SiO_2) et anhydrite (CaSO_4) très négatifs. Dans ces conditions, on peut raisonnablement écrire que les vitesses de dissolution v sont proportionnelles aux constantes cinétiques k :

$$v = kS \left(1 - \frac{Q}{K}\right) \equiv kS \text{ car } SI = \log\left(\frac{Q}{K}\right) \ll 0$$

Comme l'indique la table 4, les constantes cinétiques du quartz et de dolomite sont les deux plus faibles, ce qui explique les faibles dissolutions de ces deux espèces. A l'inverse, la calcite et l'anhydrite sont plus touchées par les dissolutions car elles présentent les constantes cinétiques les plus élevées.

Dans la zone du calcaire à algues (0 à 100 m), l'espèce majoritaire est la calcite. Elle offre donc une plus grande surface réactive que l'anhydrite, d'où une dissolution plus importante. Cet écart est atténué dans la dolomie de Mano où la surface réactive de la calcite est plus faible (moindre proportion dans la roche).

Les modifications des minéraux initiaux peuvent se résumer ainsi :

- Faible dissolution du quartz, de la dolomite et de l'anhydrite.
- Dissolution modérée de la calcite dans le calcaire à algues. Dans la dolomie de Mano, la dissolution de la calcite est plus faible mais reste le terme de dissolution le plus important : il ne s'agit pas d'un effet de saturation (la calcite est sous-saturée de manière homogène dans tout le système), mais des contrastes minéralogiques entre ces deux zones : la surface réactive est proportionnelle aux quantités de minéral et la calcite est 14 fois plus concentrée dans le calcaire à algues que dans le Mano.

4.2.2 Néominéraux

Les principaux néominéraux sont :

- L'hydroxylapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$),
- La pyrite (FeS_2) et la pyrrhotite (FeS). Ces espèces sont deux exutoires possibles au fer. Elles co-précipitent car les ratios $(kS\ Q/K)_{\text{pyrite}} / (kS\ Q/K)_{\text{pyrrhotite}}$ sont du même ordre de grandeur : facteur 60 dans le cas SOBEGI et facteur 15 dans le mélange LAP+PILA+SOBEGI.

4.2.3 Porosité

Après 40 ans d'injection, la porosité dans le calcaire à algues atteint 8.4% pour l'effluent SOBEGI seul et 8.3% pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI. Cette augmentation de porosité ($\Phi = 7.51\%$ à l'initial) est essentiellement liée à la dissolution de calcite.

Dans les 100 m traversant la dolomite de Mano, la porosité est quasi-inchangée à l'instar des quantités de calcite.

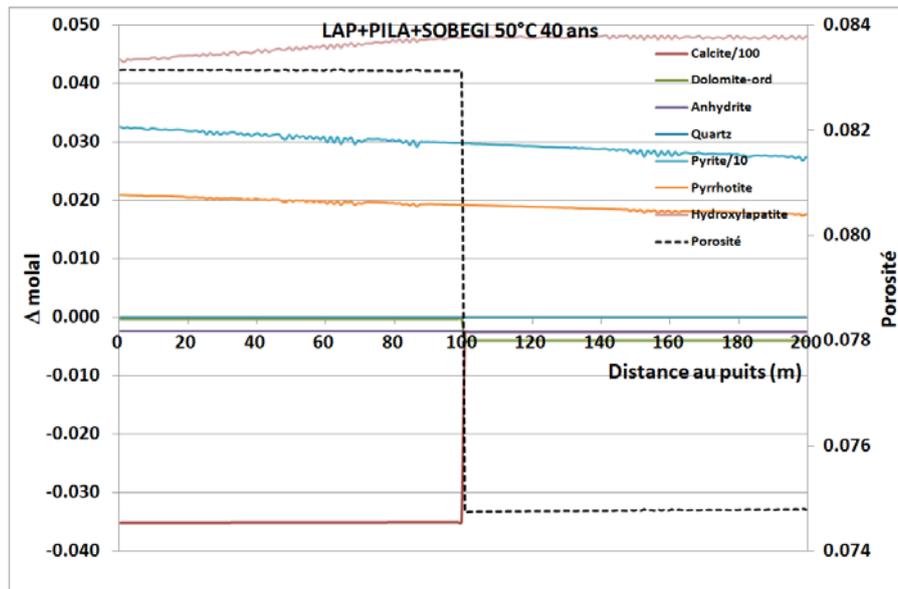


Figure 9 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

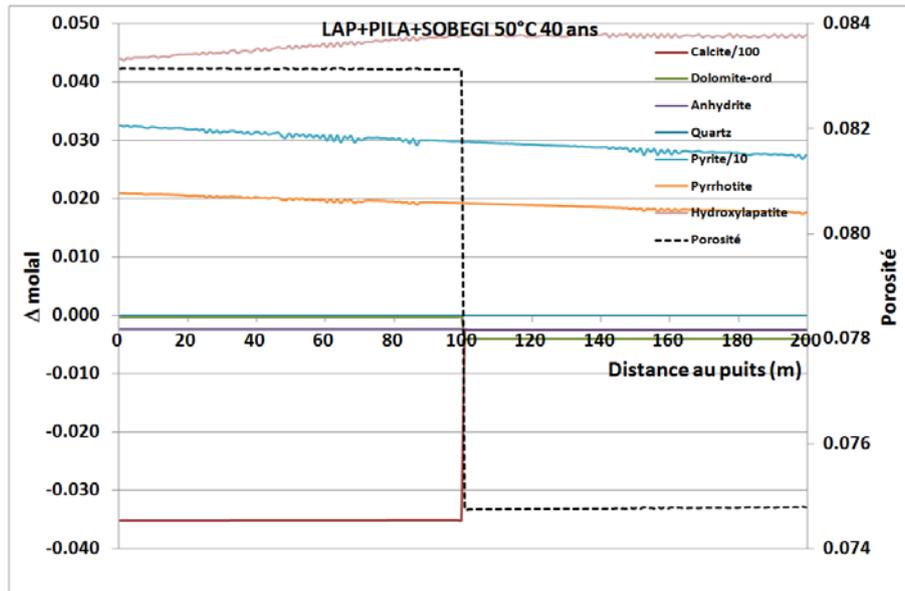


Figure 10 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

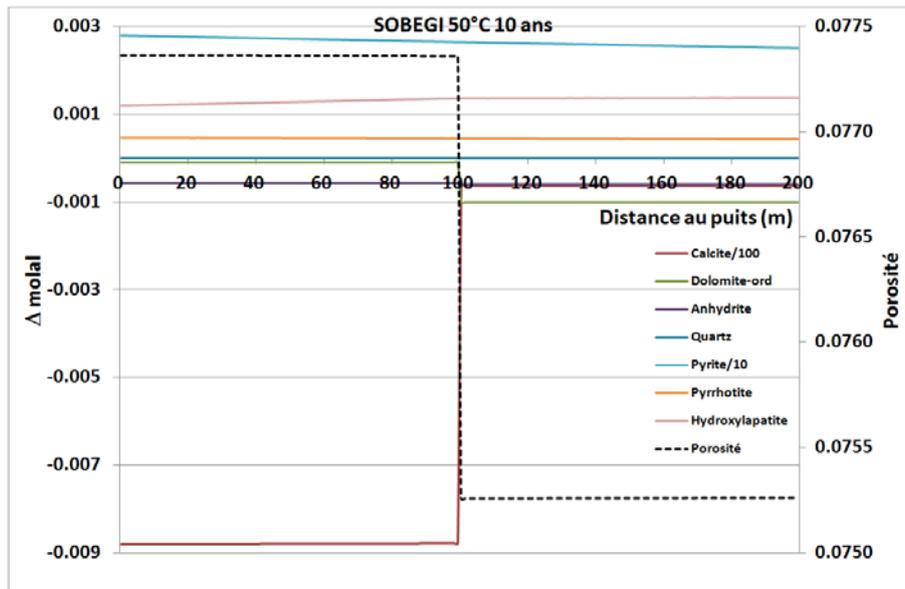


Figure 11 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

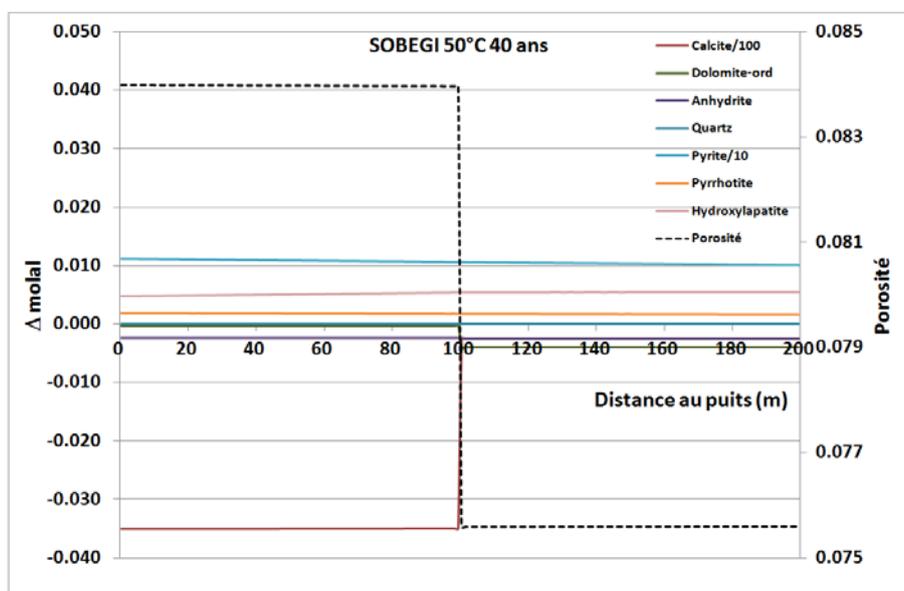


Figure 12 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

5 Discussion

5.1 Bilan des simulations chimie-transport

5.1.1 Minéraux initiaux

Les quantités dissoutes de minéraux initiaux (calcite, dolomite, quartz et anhydrite) sont les mêmes pour les 2 compositions d'effluents étudiées. De plus, les dissolutions par minéral sont homogènes à l'échelle d'une zone (calcaire à algues, dolomie de Mano). Un test réalisé avec de l'eau pure et un débit d'injection de 216 m³/j conduit au même résultat. Ce point n'est pas intuitif. Il s'explique par :

- En entrée du système, des sous-saturations très importantes qui rendent les vitesses de dissolution indépendantes de l'indice de saturation SI mais uniquement proportionnelles aux constantes cinétiques et aux surfaces réactives :

$$v = kS \left(1 - \frac{Q}{K}\right) \equiv kS \text{ car } SI = \log\left(\frac{Q}{K}\right) \ll 0$$

- Des écoulements trop rapides et/ou des cinétiques trop lentes.

L'effet de la chimie des eaux injectées sur les quantités dissoutes eût été discriminant si les solutions s'étaient en partie équilibrées avec les minéraux pendant leur circulation. Ces conditions peuvent s'obtenir avec :

- des écoulements plus lents
- des cinétiques plus rapides : surfaces réactives plus grandes ou température plus élevée.

La calcite étant le minéral le plus exposé à ces dissolutions, en raison de sa constante cinétique et de sa surface réactive, c'est elle qui contrôle les évolutions de porosité (en dehors des néoprécipitations).

5.1.2 Porosité

Pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI et l'effluent de la SOBEGI seul, la porosité à 40 ans a augmenté de manière homogène dans la zone du calcaire à algues. Cette zone passe de $\Phi = 7.515\%$ à 8.3/8.4% respectivement.

La table 6 donne les porosités extrêmes, l'extension des zones altérées, ainsi que les volumes de roche dissous/précipités à l'échelle du modèle.

| | PILA | LAP | SOBEGI | Échéance | Φ Zone dissol. | Distance dissol. (m) | $\Delta V/V_{\text{injecté}}$ | ΔV roche(*) (m ³) |
|-----------------------|------|-----|--------|----------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| 600 m ³ /j | 17% | 47% | 36% | 10 ans | 7.715% | 100 | -4.37E-07 | -0.958 |
| | | | | 40 ans | 8.313% | 100 | -4.35E-07 | -3.814 |
| 216 m ³ /j | / | / | 100% | 10 ans | 7.736% | 100 | -1.47E-06 | -1.163 |
| | | | | 40 ans | 8.398% | 100 | -1.47E-06 | -4.633 |

(*) V roche initial = 924.85 m³

Tableau 6 : Modifications maximales de porosité et leur extension après 10 et 40 ans d'injection. L'ensemble du système (calcaire à algues + dolomie de Mano) est pris en compte.

5.2 Commentaires sur l'approche 1D adoptée

Le modèle utilisé suppose l'existence à l'initial, d'un réseau de fractures dont les épontes représentent le centième de la surface réactive (hypothèse surf. réactive = 1/100 surf. géométrique). Cette surface réactive a été ramenée à une surface spécifique par minéral (A_i^0 en cm^2/g de minéral i) qui reste constante dans les simulations. Ainsi, si m_i représente, à un instant donné, la masse de minéral i dans une maille, la cinétique de réaction de l'espèce i est proportionnelle au produit $A_i^0 m_i$.

L'expérience de stimulation acide des puits pétroliers dans les réservoirs carbonatés (en vue d'augmenter la productivité des puits) montre, sous certaines conditions, le développement de motifs de dissolution en trous de vers (wormholes) qui constituent des chemins préférentiels pour l'écoulement (figure 13). Dans de telles conditions, la surface efficacement exposée à l'écoulement décroît fortement puisque le flux convectif se concentre dans des zones restreintes.

Or, l'approche 1D adoptée dans cette étude implique que tous les minéraux compris dans une maille participent équitablement aux échanges chimiques puisque l'écoulement est considéré homogène à l'échelle d'une maille. De ce fait, les taux de dissolution par volume de roche calculés dans cette étude pourraient être surestimés; le développement de wormholes impliquant une altération moins forte mais ressentie sur de plus grandes distances.

La prise en compte des wormholes pourrait se faire de deux manières :

- Explicitement, par une approche 2D/3D avec un maillage très fin donc difficilement réalisable compte tenu des échelles mises en jeu dans cette étude. Cette méthode implique d'autre part la connaissance des lois de distribution des hétérogénéités chimiques et pétrographiques.
- Implicitement, en affectant une loi macroscopique d'altération des surfaces spécifiques avec le taux de dissolution : dans une maille, la cinétique est proportionnelle au produit $A_i \times m_i$ avec $A_i = A_i^0 \left(\frac{m_i}{m_i^0} \right)^\alpha$ où α est un coefficient >1 . Cette corrélation permet de rendre compte de la fraction de minéral participant toujours aux échanges (les minéraux à la paroi des wormholes). Il faut ici connaître le coefficient α et son évolution dans le temps.

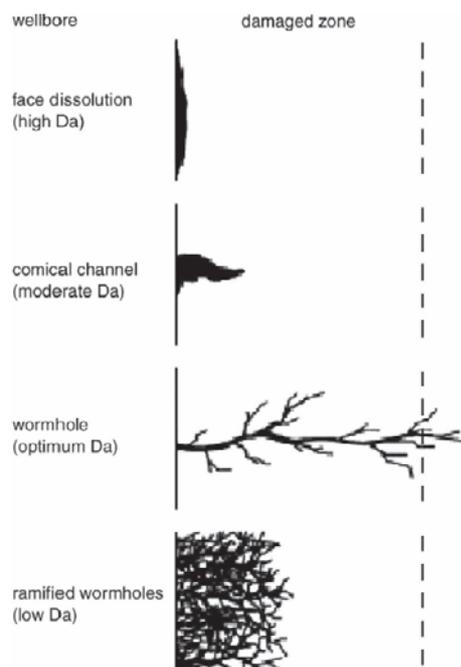


Figure 13 : Motifs de dissolution de carbonates par injection d'acide suivant le nombre de Damköhler (nombre adimensionnel représentant le ratio de la vitesse de réaction sur le flux convectif). D'après Hoefner & Fogler (1989).

5.3 Etudes de sensibilité

Nous étudions dans cette partie la sensibilité des résultats à la température et aux surfaces réactives. Pour comparer ces effets, nous avons utilisé l'effluent SOBEGI seul.

5.3.1 Effet de la température (Fig. 14.b)

Les simulations présentées au chapitre 5 ont été réalisées à 50°C, la température atteinte par la formation après quelques mois d'injection. Des tests complémentaires ont été réalisés à 140°C (température avant injection). Les modifications minéralogiques concernent les mêmes espèces et donc les mêmes mécanismes qu'à 50°C. On note cependant des amplitudes plus fortes (facteur 10 pour la calcite par exemple), liées :

- à l'augmentation des constantes cinétiques (table 4),
- à des effets thermodynamiques : la solubilité de la calcite, par exemple, augmente avec la température.

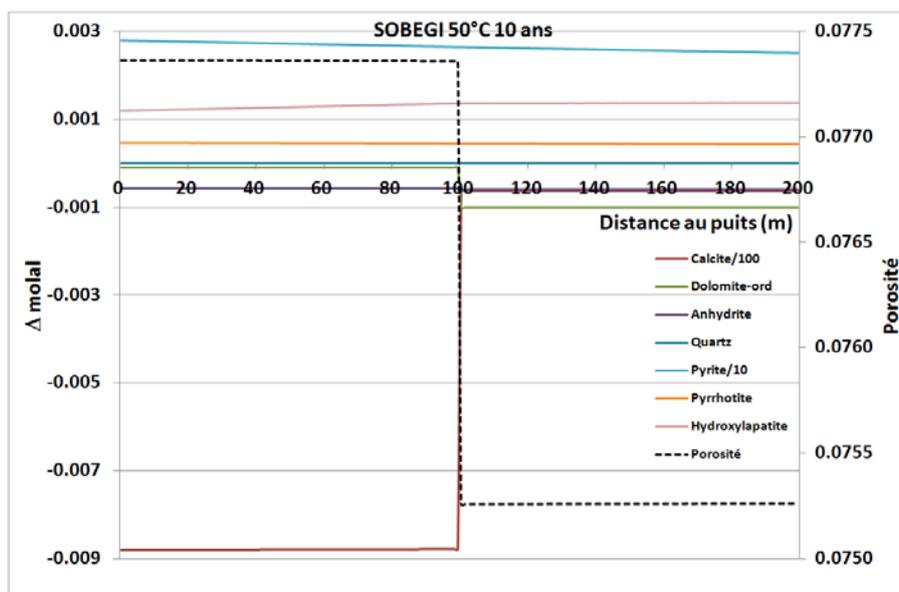
Dans cet exemple, la porosité maximale atteint 9% en entrée du calcaire à algues au bout de 10 ans.

5.3.2 Effet des surfaces réactives (Fig. 14.c)

Les surfaces réactives utilisées dans cette étude sont déduites des surfaces géométriques auxquelles un facteur 1/100 a été appliqué (Bethke, 1996 ; Gaus et al., 2005).

L'utilisation de surfaces réactives égales aux surfaces géométriques peut entraîner :

- une surestimation de la variation de la porosité avec une dissolution de calcite en entrée 100 fois plus fortes
- un motif d'attaque plus frontal que les motifs homogènes obtenus au § 5.2. Ce front s'étale sur une cinquantaine de mètres après 10 ans d'injection avec une porosité comprise entre 25 et 15%.



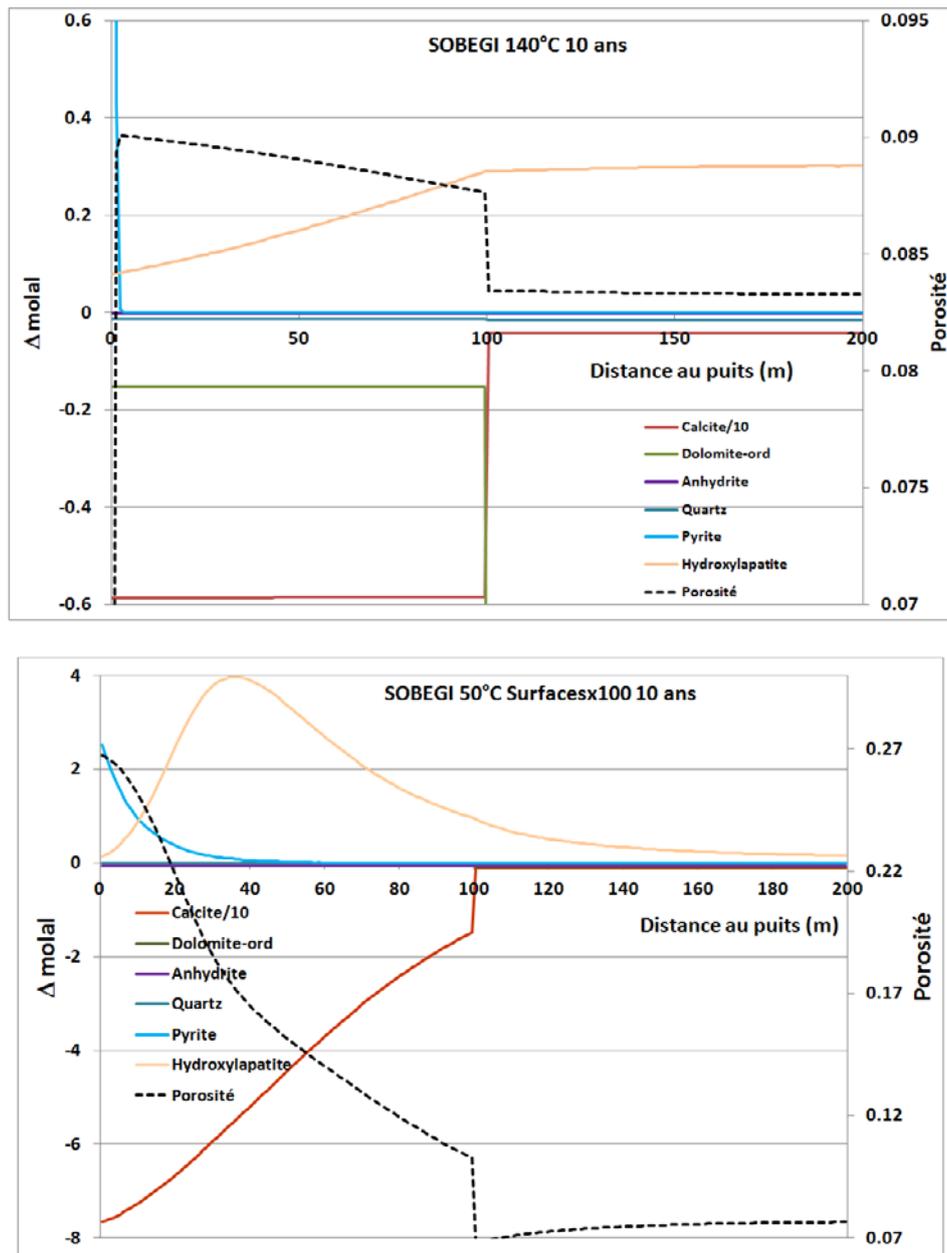


Figure 14 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 10 ans d'injection. De haut en bas : Fig. 14.a = cas de base (= Fig. 11) ; Fig. 14.b. = sensibilité à la température (140°C) ; Fig 14.c = sensibilité aux surfaces réactives (surfaces multipliées par 100). Les échelles sont différentes dans chaque figure (voir légende).

6 Références

G. Berger (2006) *Modélisation de l'injection d'eaux industrielles dans le réservoir de Lacq*. Rapport d'expertise.

C. M. Bethke (1996) *Geochemical reaction Modeling. Concepts and Applications*. New York – Oxford. OXFORD UNIVERSITY PRESS.

BRGM (03/2009) *Avis sur le dossier «Injection des eaux sodées d'Arkema Mont » à Lacq (64)*. Rapport provisoire BRGM/RP-57226-FR.

P. Chiquet (2008) *Test du module thermique de GEM-GHG pour l'étude de l'injection de CO₂. Application au modèle phénoménologique de Rousse*. Rapport Ajilon Engineering.

A. Commarieu (2005) *Comparaison des compositions des eaux sodées de Mont avec les eaux sodées de Lacq*. Rapport ACO 05.193.

J. F. Devaux, K. Bourda (2004) *Injection des eaux sodées de l'unité de lactame dans le crétacé 4000 : données complémentaires*. Compte rendu technique. GRL SID 14143.

I. Gaus, M. Azaroual, I. Czernichowski-Lauriol (2005) *Reactive transport modeling of the impact of the CO₂ injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea)*. Chemical Geology 217, 319-337

W. J. Harrison, G. D. Thyne (1992) *Predictions of diagenetic reactions in the presence of organic acids*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 56, 565-586.

M. L. Hoefner, H. S. Fogler (1989) *Fluid-Velocity and Reaction-Rate Effects During Carbonate Acidizing: Application of Network Model*. SPE 15537

J. L. Palandri, Y. K. Kharaka (2004) *A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling*. USGS Open File Report #2004-1068.

TEPF (2006) *Dossier de demande d'autorisation d'injection des eaux de MONT-ARKEMA*.

7 Annexes – Spéciation des eaux aux conditions labo et mélanges aux conditions fond

| MONT 20.5°C sans correction de l'alcalinité/pH | | | | | | | | | | |
|--|-------|-----------|--------|-------------|------------|-------------|-----------|----------|--------------------------|-------------|
| Analyse Simulation | | | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | | |
| pH | 12.85 | 12.85 | Na[+] | 1.8567 | 1.2924 | Fe(OH)2(aq) | 2.57E-08 | 4.68E-08 | | |
| Alcalinité | meq/l | 570.4 | 300 | SO4[2-] | 0.49687 | 0.05639 | KCl(aq) | 1.15E-08 | 2.09E-08 | |
| force ionique | | 2.60E+00 | Ad[-] | 0.28235 | 0.19654 | FeOH[+] | 1.19E-09 | 8.32E-10 | | |
| elec imb | eq/l | -4.27E-04 | Do[2-] | 0.24639 | 0.027963 | HAd(aq) | 8.70E-10 | 1.58E-09 | | |
| RSH | ppm | 6 | 5.56 | OH[-] | 0.073771 | 0.04855 | HDo[-] | 1.11E-10 | 7.76E-11 | |
| Chlorures | mg/l | 286 | 286 | NH3(aq) | 0.025083 | 0.045656 | CaCl2(aq) | 9.53E-11 | 1.73E-10 | |
| Sulfates | mg/l | 46678 | 46680 | Cl[-] | 0.0077079 | 0.0047414 | FeDo(aq) | 5.81E-11 | 1.06E-10 | |
| Thiosulfates | mg/l | 111 | 111 | NaOH(aq) | 0.0055782 | 0.010153 | FeSO4(aq) | 1.82E-12 | 3.32E-12 | |
| Nitrates | mg/l | 203 | 203 | NO3[-] | 0.0033488 | 0.00206 | Fe[2+] | 1.77E-12 | 3.71E-13 | |
| Fer | mg/l | 1.08 | 1.08 | S2O3[2-] | 0.0010127 | 0.00011493 | HSO4[-] | 9.53E-13 | 6.63E-13 | |
| Ammonium | mg/l | 409 | 418 | NaCl(aq) | 0.0005448 | 0.00099163 | FeAd[+] | 7.62E-13 | 5.31E-13 | |
| Sodium | mg/l | 28196 | 41860 | CaDo(aq) | 0.0004508 | 0.00082054 | H[+] | 1.54E-13 | 1.41E-13 | |
| Calcium | mg/l | 35 | 35 | K[+] | 0.00024645 | 0.0001516 | NH4SO4[-] | 4.55E-15 | 3.17E-15 | |
| Potassium | mg/l | 13 | 13 | Ca[2+] | 0.00015443 | 3.24E-05 | FeCl[+] | 1.72E-15 | 1.20E-15 | |
| Ref. Commarieu (2005) | | | | CaSO4(aq) | 0.00012522 | 0.00022793 | HCl(aq) | 7.95E-17 | 1.45E-16 | |
| Devaux & Bourda (2004) pour les organiques | | | | CaAd[+] | 0.00011594 | 8.07E-05 | HNO3(aq) | 7.11E-18 | 1.29E-17 | |
| | | | | CH3S[-] | 0.00011589 | 7.13E-05 | KHSO4(aq) | 3.55E-18 | 6.46E-18 | |
| | | | | KSO4[-] | 9.16E-05 | 6.38E-05 | FeCl2(aq) | 1.56E-20 | 2.83E-20 | |
| | | | | CaOH[+] | 4.65E-05 | 3.24E-05 | H2Do(aq) | 2.76E-23 | 5.03E-23 | |
| | | | | NH4[+] | 2.83E-05 | 1.60E-05 | FeCl4[2-] | 2.02E-23 | 2.29E-24 | |
| | | | | Fe(OH)3[-] | 1.89E-05 | 1.32E-05 | H2SO4(aq) | 5.89E-29 | 1.07E-28 | |
| | | | | KOH(aq) | 2.04E-06 | 3.72E-06 | | | pH | 12.85 |
| | | | | Fe(OH)4[2-] | 8.22E-07 | 9.33E-08 | | | Force ionique | 2.60113 |
| | | | | CaNO3[+] | 4.80E-07 | 3.34E-07 | | | Elec. imb. (eq/l) | -0.00042748 |
| | | | | CH3SH(aq) | 1.39E-07 | 2.53E-07 | | | Min Sursaturé | SI (logQ/K) |
| | | | | CaCl[+] | 4.40E-08 | 3.06E-08 | | | Mirabilite | 0.3463 |

| MONT 20.5°C avec correction de l'alcalinité/pH | | | | | | | | | | |
|--|-------|-----------|--------|-------------|----------|-----------|-------------|----------|--------------------------|-------------|
| Analyses Simulation | | | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | | |
| pH | 12.85 | 13.5 | Na[+] | 2.1054 | 1.4869 | KCl(aq) | 1.08E-08 | 2.09E-08 | | |
| Alcalinité | meq/ | 570.4 | 570 | SO4[2-] | 0.4969 | 0.055718 | Fe(OH)2(aq) | 4.80E-09 | 9.25E-09 | |
| force ionique | | 2.85E+00 | OH[-] | 0.32535 | 0.21687 | HAd(aq) | 1.86E-10 | 3.60E-10 | | |
| elec imb | eq/l | -2.14E-03 | Ad[-] | 0.28236 | 0.19941 | CaCl2(aq) | 8.00E-11 | 1.54E-10 | | |
| RSH | ppm | 6 | 5.59 | Do[2-] | 0.24647 | 2.76E-02 | FeOH[+] | 5.22E-11 | 3.68E-11 | |
| Chlorures | mg/l | 286 | 286 | NaOH(aq) | 2.71E-02 | 5.22E-02 | HDo[-] | 2.43E-11 | 1.72E-11 | |
| Sulfates | mg/l | 46678 | 46680 | NH3(aq) | 2.39E-02 | 4.60E-02 | FeDo(aq) | 5.37E-13 | 1.04E-12 | |
| Sulfites | mg/l | | | Cl[-] | 7.66E-03 | 4.76E-03 | HSO4[-] | 2.08E-13 | 1.47E-13 | |
| Thiosulfates | mg/l | 111 | 111 | NO3[-] | 3.35E-03 | 2.08E-03 | H[+] | 3.37E-14 | 3.16E-14 | |
| Nitrates | mg/l | 203 | 203 | S2O3[2-] | 1.01E-03 | 1.14E-04 | Fe[2+] | 1.75E-14 | 3.68E-15 | |
| Fer | mg/l | 1.08 | 1.08 | NaCl(aq) | 5.94E-04 | 1.15E-03 | FeSO4(aq) | 1.69E-14 | 3.25E-14 | |
| Ammonium | mg/l | 409 | 397.6 | CaDo(aq) | 3.71E-04 | 7.16E-04 | FeAd[+] | 7.56E-15 | 5.34E-15 | |
| Sodium | mg/l | 28196 | 47940 | K[+] | 2.43E-04 | 1.51E-04 | NH4SO4[-] | 1.00E-15 | 7.06E-16 | |
| Calcium | mg/l | 35 | 35 | CaOH[+] | 1.81E-04 | 1.28E-04 | FeCl[+] | 1.69E-17 | 1.19E-17 | |
| Potassium | mg/l | 13 | 13 | Ca[2+] | 1.36E-04 | 2.86E-05 | HCl(aq) | 1.69E-17 | 3.25E-17 | |
| | | | | CH3S[-] | 1.22E-04 | 7.56E-05 | HNO3(aq) | 1.52E-18 | 2.93E-18 | |
| Ref. Commarieu (2005) | | | | CaSO4(aq) | 1.03E-04 | 1.99E-04 | KHSO4(aq) | 7.37E-19 | 1.42E-18 | |
| Devaux & Bourda (2004) pour les organiques | | | | CaAd[+] | 1.02E-04 | 7.23E-05 | FeCl2(aq) | 1.47E-22 | 2.83E-22 | |
| | | | | KSO4[-] | 8.88E-05 | 6.27E-05 | H2Do(aq) | 1.29E-24 | 2.49E-24 | |
| | | | | Fe(OH)3[-] | 1.65E-05 | 1.16E-05 | FeCl4[2-] | 2.06E-25 | 2.31E-26 | |
| | | | | KOH(aq) | 8.58E-06 | 1.65E-05 | H2SO4(aq) | 2.75E-30 | 5.31E-30 | |
| | | | | NH4[+] | 6.35E-06 | 3.62E-06 | | | pH | 13.5 |
| | | | | Fe(OH)4[2-] | 3.29E-06 | 3.68E-07 | | | Force ionique | 2.85149 |
| | | | | CaNO3[+] | 4.22E-07 | 2.98E-07 | | | Elec. imb. (eq/l) | -0.0021434 |
| | | | | CaCl[+] | 3.84E-08 | 2.71E-08 | | | Min Sursaturé | SI (logQ/K) |
| | | | | CH3SH(aq) | 3.11E-08 | 6.00E-08 | Mirabilite | | 0.4629 | |

| PILA (D10861) 22°C | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|---|------------|----------|----------|--------------|----------|-------------------|-------------|
| Analyses Simulation | | | Espèce Molal Activité Espèce Molal Activité | | | | | | | |
| pH | | 12.4 | 12.4 | Na[+] | 0.47422 | 0.32117 | CaOx | 1.86E-06 | 2.11E-06 | |
| Alcalinité | meq/l | 990 | 430 | CH3S[-] | 0.15169 | 0.096512 | MgSO4(aq) | 9.92E-07 | 1.13E-06 | |
| force ionique | | | 5.59E-01 | HS[-] | 0.089042 | 0.05857 | CaCl[+] | 9.05E-07 | 6.13E-07 | |
| elec imb | eq/l | | -2.78E-04 | S[2-] | 0.063949 | 0.013973 | HPO4[2-] | 8.82E-07 | 1.59E-07 | |
| RSH | ppm | 7322 | 7280 | OH[-] | 0.030667 | 0.020172 | NaHPO4[-] | 6.25E-07 | 4.23E-07 | |
| Sulfures | ppm | 5060 | 5213 | Cl[-] | 0.030075 | 0.019135 | KCl(aq) | 3.44E-07 | 3.91E-07 | |
| Chlorures | mg/l | 1073 | 1073 | Ac[-] | 0.012478 | 8.67E-03 | MgOx | 3.22E-07 | 3.66E-07 | |
| Sulfates | mg/l | 247 | 247 | SO3[2-] | 0.010963 | 2.19E-03 | H2S(aq) | 2.19E-07 | 2.49E-07 | |
| Sulfites | mg/l | 858 | 858 | NH3(aq) | 7.59E-03 | 8.63E-03 | Fe(OH)4[2-] | 2.17E-07 | 3.90E-08 | |
| Thiosulfates | mg/l | 413 | 413 | S2O3[2-] | 3.77E-03 | 6.78E-04 | MgCl[+] | 2.10E-07 | 1.42E-07 | |
| Nitrates | mg/l | 3 | 3 | SO4[2-] | 2.62E-03 | 4.71E-04 | Fe(OH)2(aq) | 1.36E-07 | 1.55E-07 | |
| Phosphates | mg/l | 14 | 14.15 | K[+] | 1.06E-03 | 6.77E-04 | CaNO3[+] | 3.72E-08 | 2.52E-08 | |
| Acétates | mg/l | 733 | 733 | NaOH(aq) | 9.13E-04 | 1.04E-03 | Mg4(OH)4[4+] | 2.69E-08 | 7.28E-11 | |
| Fer | mg/l | 1.27 | 1.27 | NaCl(aq) | 8.85E-04 | 1.01E-03 | HSO3[-] | 1.99E-08 | 1.35E-08 | |
| Ammonium | mg/l | 134 | 126.5 | CH3SH(aq) | 8.49E-04 | 9.65E-04 | CaHPO4(aq) | 1.23E-08 | 1.39E-08 | |
| Sodium | mg/l | 21933 | 10700 | Ca[2+] | 6.26E-04 | 1.60E-04 | CaCl2(aq) | 1.20E-08 | 1.37E-08 | |
| Calcium | mg/l | 34 | 34 | CaPO4[-] | 1.29E-04 | 8.75E-05 | FeOH[+] | 1.15E-08 | 7.77E-09 | |
| Magnesium | mg/l | 1.1 | 1.1 | Ox[2-] | 1.00E-04 | 1.40E-05 | MgHPO4(aq) | 1.14E-09 | 1.30E-09 | |
| Potassium | mg/l | 41 | 41 | CaOH[+] | 8.38E-05 | 5.68E-05 | KHPO4[-] | 9.54E-10 | 6.46E-10 | |
| Oxalates | mg/l | 9 | 8.8 | NO3[-] | 4.95E-05 | 3.15E-05 | FePO4[-] | 2.33E-10 | 1.58E-10 | |
| | | | | Mg[2+] | 3.12E-05 | 1.01E-05 | | | pH | 12.4 |
| Ref. Commarieu (2005) | | | | Fe(OH)3[-] | 2.29E-05 | 1.55E-05 | | | Force ionique | 0.558937 |
| | | | | CaAc[+] | 1.74E-05 | 1.18E-05 | | | Elec. imb. (eq/l) | -0.00027771 |
| | | | | NH4[+] | 1.21E-05 | 7.40E-06 | | | Min Sursaturé | SI (logQ/K) |
| | | | | MgPO4[-] | 1.10E-05 | 7.42E-06 | | | Hydroxylapatite | 12.96 |
| | | | | PO4[3-] | 9.06E-06 | 1.79E-07 | | | Pyrite | 7.752 |
| | | | | CaSO4(aq) | 8.37E-06 | 9.52E-06 | | | Troilite | 3.964 |
| | | | | KOH(aq) | 5.18E-06 | 5.89E-06 | | | Pyrrhotite | 3.864 |
| | | | | KSO4[-] | 3.53E-06 | 2.39E-06 | | | Whitlockite | 3.832 |
| | | | | MgAc[+] | 2.54E-06 | 1.72E-06 | | | Brucite | 3.307 |

| LAP (D40308) 22°C | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|---|-----------|----------|----------|------------|----------|-------------------|-------------|
| Analyses Simulation | | | Espèce Molal Activité Espèce Molal Activité | | | | | | | |
| pH | | 5.8 | 5.8 | H2S(aq) | 0.020331 | 0.02035 | MgCl[+] | 6.02E-08 | 5.62E-08 | |
| Alcalinité | meq/l | 1 | 1.5 | CH3SH(aq) | 5.65E-03 | 5.65E-03 | CaCl[+] | 3.40E-08 | 3.18E-08 | |
| force ionique | | | 4.15E-03 | Cl[-] | 3.66E-03 | 3.41E-03 | FeAc[+] | 3.10E-08 | 2.89E-08 | |
| elec imb | eq/l | | -4.31E-03 | HS[-] | 1.29E-03 | 1.20E-03 | CaHPO4(aq) | 2.54E-08 | 2.54E-08 | |
| RSH | ppm | 271 | 271 | NH4[+] | 1.19E-03 | 1.11E-03 | FeHPO4(aq) | 2.42E-08 | 2.42E-08 | |
| Sulfures | ppm | 715 | 699 | Ac[-] | 2.56E-04 | 2.39E-04 | MgHPO4(aq) | 1.81E-08 | 1.81E-08 | |
| Chlorures | mg/l | 127 | 127 | S2O3[2-] | 2.10E-04 | 1.59E-04 | FeCl[+] | 1.53E-08 | 1.43E-08 | |
| Sulfates | mg/l | 9 | 9 | Na[+] | 1.25E-04 | 1.16E-04 | H2SO3(aq) | 1.14E-08 | 1.14E-08 | |
| Sulfites | mg/l | 6 | 6 | SO4[2-] | 9.49E-05 | 7.19E-05 | KSO4[-] | 1.13E-08 | 1.05E-08 | |
| Thiosulfates | mg/l | 23 | 23 | HSO3[-] | 7.30E-05 | 6.81E-05 | HSO4[-] | 1.07E-08 | 1.00E-08 | |
| Nitrates | mg/l | 0.9 | 0.9 | Ca[2+] | 6.07E-05 | 4.64E-05 | SO2(aq) | 7.31E-09 | 7.32E-09 | |
| Phosphates | mg/l | 2.7 | 2.73 | Mg[2+] | 2.89E-05 | 2.23E-05 | H3PO4(aq) | 5.86E-09 | 5.86E-09 | |
| Acétates | mg/l | 16 | 16.3 | H2PO4[-] | 2.77E-05 | 2.58E-05 | OH[-] | 5.43E-09 | 5.07E-09 | |
| Fer | mg/l | 0.443 | 0.443 | AcH(aq) | 2.16E-05 | 2.16E-05 | CaNO3[+] | 3.45E-09 | 3.22E-09 | |
| Ammonium | mg/l | 21 | 19.8 | K[+] | 2.09E-05 | 1.95E-05 | KCl(aq) | 2.01E-09 | 2.01E-09 | |
| Sodium | mg/l | 2.8 | 2.8 | NO3[-] | 1.48E-05 | 1.38E-05 | FeOH[+] | 1.30E-09 | 1.22E-09 | |
| Calcium | mg/l | 2.4 | 2.4 | Fe[2+] | 7.97E-06 | 6.10E-06 | HCl(aq) | 1.16E-09 | 1.16E-09 | |
| Magnesium | mg/l | 0.7 | 0.7 | SO3[2-] | 3.65E-06 | 2.78E-06 | NaHPO4[-] | 1.03E-09 | 9.64E-10 | |
| Potassium | mg/l | 0.8 | 0.8 | H[+] | 1.69E-06 | 1.58E-06 | FePO4[-] | 1.67E-10 | 1.56E-10 | |
| | | | | HPO4[2-] | 1.32E-06 | 9.97E-07 | CaCl2(aq) | 1.26E-10 | 1.26E-10 | |
| Ref. Commarieu (2005) | | | | CaSO4(aq) | 4.22E-07 | 4.23E-07 | | | | |
| | | | | MgSO4(aq) | 3.82E-07 | 3.82E-07 | | | pH | 5.8 |
| | | | | NH3(aq) | 3.25E-07 | 3.25E-07 | | | Force ionique | 0.00414535 |
| | | | | CH3S[-] | 1.52E-07 | 1.42E-07 | | | Elec. imb. (eq/l) | -0.0043104 |
| | | | | MgAc[+] | 1.13E-07 | 1.05E-07 | | | Min Sursaturé | SI (logQ/K) |
| | | | | CaAc[+] | 1.01E-07 | 9.43E-08 | | | Pyrite | 12.04 |
| | | | | FeSO4(aq) | 6.95E-08 | 6.96E-08 | | | Troilite | 1.471 |
| | | | | NaCl(aq) | 6.50E-08 | 6.50E-08 | | | Pyrrhotite | 1.371 |

| LAP+PILA+MONT 140C (sans correction alcalinité/pH pour Mont) | | | | | |
|--|------------|------------|---|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Na ⁺ | 0.74884 | 0.43982 | CaAc ⁺ | 8.23E-07 | 4.83E-07 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.1793 | 0.015223 | Mg ²⁺ | 3.65E-07 | 8.06E-08 |
| Ad ⁻ | 0.10166 | 0.059708 | HDo ⁻ | 2.41E-07 | 1.42E-07 |
| Do ²⁻ | 0.088461 | 0.0075109 | CaPO ₄ ⁻ | 2.31E-07 | 1.36E-07 |
| OH ⁻ | 0.024569 | 0.01371 | FeAd ⁺ | 2.00E-07 | 1.17E-07 |
| S ²⁻ | 0.022887 | 0.0027054 | Fe ²⁺ | 1.50E-07 | 2.28E-08 |
| CH ₃ SH(aq) | 0.016735 | 0.021282 | KCl(aq) | 1.02E-07 | 1.29E-07 |
| HS ⁻ | 0.01328 | 0.0074102 | FeOH ⁺ | 9.07E-08 | 5.33E-08 |
| CH ₃ S ⁻ | 0.011896 | 0.0062512 | CaCl ⁺ | 4.88E-08 | 2.87E-08 |
| NH ₃ (aq) | 0.010185 | 0.012953 | CaOx | 4.71E-08 | 5.99E-08 |
| Cl ⁻ | 0.0090701 | 0.0047662 | FeSO ₄ (aq) | 4.33E-08 | 5.51E-08 |
| Ac ⁻ | 0.0022542 | 0.0013838 | CaNO ₃ ⁺ | 3.67E-08 | 2.16E-08 |
| SO ₃ ²⁻ | 0.0018904 | 0.00019155 | FePO ₄ ⁻ | 2.32E-08 | 1.36E-08 |
| NaOH(aq) | 0.001858 | 0.0023629 | AcH(aq) | 2.03E-08 | 2.58E-08 |
| NO ₃ ⁻ | 0.0012211 | 0.00064167 | H ₂ PO ₄ ⁻ | 1.36E-08 | 7.97E-09 |
| S ₂ O ₃ ²⁻ | 0.0011038 | 9.37E-05 | HSO ₄ ⁻ | 1.33E-08 | 7.80E-09 |
| NaCl(aq) | 0.00088674 | 0.0011277 | CaOH ⁺ | 1.19E-08 | 6.99E-09 |
| CaDo(aq) | 0.0003751 | 0.00047703 | MgAc ⁺ | 7.20E-09 | 4.23E-09 |
| K ⁺ | 0.0002274 | 0.00011949 | CaHPO ₄ (aq) | 5.78E-09 | 7.35E-09 |
| KSO ₄ ⁻ | 8.72E-05 | 5.12E-05 | MgPO ₄ ⁻ | 3.74E-09 | 2.19E-09 |
| CaSO ₄ (aq) | 5.32E-05 | 6.77E-05 | FeAc ⁺ | 3.46E-09 | 2.03E-09 |
| Ca ²⁺ | 4.39E-05 | 6.71E-06 | P ₂ O ₇ ⁴⁻ | 3.40E-09 | 1.26E-13 |
| CaAd ⁺ | 2.45E-05 | 1.44E-05 | | | |
| HPO ₄ ²⁻ | 2.35E-05 | 1.99E-06 | <i>pH</i> | | 9.868 |
| Ox ²⁻ | 1.73E-05 | 9.43E-07 | <i>Force ionique</i> | | 1.044 |
| NH ₄ ⁺ | 1.71E-05 | 8.35E-06 | <i>Elec. lmb. (eq/l)</i> | | -0.0021571 |
| FeDo(aq) | 1.44E-05 | 1.83E-05 | <i>Min Sursaturé</i> | | SI (logQ/K) |
| NaHPO ₄ ⁻ | 1.24E-05 | 7.30E-06 | Hydroxylapatite | | 11.74 |
| MgDo(aq) | 1.23E-05 | 1.57E-05 | Pyrite | | 5.925 |
| HSO ₃ ⁻ | 9.35E-06 | 5.49E-06 | Troilite | | 4.693 |
| MgSO ₄ (aq) | 7.94E-06 | 1.01E-05 | Pyrrhotite | | 4.621 |
| PO ₄ ³⁻ | 3.10E-06 | 1.05E-08 | Whitlockite | | 4.612 |
| H ₂ S(aq) | 2.37E-06 | 3.02E-06 | FeO | | 3.736 |
| MgAd ⁺ | 1.09E-06 | 6.38E-07 | Fe(OH) ₂ | | 2.779 |
| HAd(aq) | 1.06E-06 | 1.35E-06 | Brucite | | 1.629 |

| LAP+PILA+MONT 140C (correction alcalinité/pH pour Mont) | | | | | |
|---|------------|------------|----------------------------------|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Na ⁺ | 0.83981 | 0.49261 | Mg ²⁺ | 3.89E-07 | 8.52E-08 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.1793 | 0.014662 | FeOH ⁺ | 3.72E-07 | 2.18E-07 |
| Ad ⁻ | 0.10166 | 0.059631 | HAd(aq) | 2.59E-07 | 3.37E-07 |
| OH ⁻ | 0.098308 | 0.054675 | FeAd ⁺ | 2.05E-07 | 1.21E-07 |
| Do ²⁻ | 0.088466 | 0.0072341 | H ₂ S(aq) | 1.97E-07 | 2.56E-07 |
| S ²⁻ | 0.031665 | 0.0036473 | Fe ²⁺ | 1.56E-07 | 2.35E-08 |
| CH ₃ S ⁻ | 0.021324 | 0.011139 | Fe(OH) ₃ ⁻ | 1.02E-07 | 5.97E-08 |
| NH ₃ (aq) | 0.010198 | 0.013272 | KCl(aq) | 9.84E-08 | 1.28E-07 |
| Cl ⁻ | 0.0089995 | 0.0047013 | FePO ₄ ⁻ | 7.05E-08 | 4.14E-08 |
| NaOH(aq) | 0.0081098 | 0.010555 | HDo ⁻ | 5.83E-08 | 3.42E-08 |
| CH ₃ SH(aq) | 0.0073069 | 0.0095096 | CaCl ⁺ | 5.06E-08 | 2.97E-08 |
| HS ⁻ | 0.0045041 | 0.002505 | CaOH ⁺ | 4.99E-08 | 2.93E-08 |
| Ac ⁻ | 0.0022542 | 0.0013842 | CaOx | 4.57E-08 | 5.95E-08 |
| SO ₃ ²⁻ | 0.0018975 | 0.00018637 | FeSO ₄ (aq) | 4.19E-08 | 5.45E-08 |
| NO ₃ ⁻ | 0.0012211 | 0.0006379 | Fe(OH) ₂ (aq) | 3.92E-08 | 5.10E-08 |
| S ₂ O ₃ ²⁻ | 0.0011038 | 9.03E-05 | CaNO ₃ ⁺ | 3.84E-08 | 2.25E-08 |
| NaCl(aq) | 0.0009573 | 0.0012459 | MgPO ₄ ⁻ | 1.17E-08 | 6.85E-09 |
| CaDo(aq) | 0.00037084 | 0.00048264 | KOH(aq) | 9.42E-09 | 1.23E-08 |
| K ⁺ | 0.00023003 | 0.00012017 | MgAc ⁺ | 7.63E-09 | 4.47E-09 |
| KSO ₄ ⁻ | 8.45E-05 | 4.96E-05 | AcH(aq) | 4.97E-09 | 6.47E-09 |
| CaSO ₄ (aq) | 5.26E-05 | 6.85E-05 | CaHPO ₄ (aq) | 4.40E-09 | 5.72E-09 |
| Ca ²⁺ | 4.70E-05 | 7.05E-06 | FeAc ⁺ | 3.56E-09 | 2.09E-09 |
| CaAd ⁺ | 2.57E-05 | 1.51E-05 | | | |
| HPO ₄ ²⁻ | 1.81E-05 | 1.48E-06 | <i>pH</i> | | 10.47 |
| Ox ²⁻ | 1.73E-05 | 8.92E-07 | <i>Force ionique</i> | | 1.144 |
| FeDo(aq) | 1.39E-05 | 1.81E-05 | <i>Elec. lmb. (eq/l)</i> | | -0.0030672 |
| MgDo(aq) | 1.23E-05 | 1.60E-05 | <i>Min Sursaturé</i> | | SI (logQ/K) |
| NaHPO ₄ ⁻ | 1.03E-05 | 6.05E-06 | Hydroxylapatite | | 13.86 |
| PO ₄ ³⁻ | 1.01E-05 | 3.10E-08 | Whitlockite | | 5.617 |
| MgSO ₄ (aq) | 7.90E-06 | 1.03E-05 | Pyrite | | 4.958 |
| NH ₄ ⁺ | 4.42E-06 | 2.14E-06 | FeO | | 4.95 |
| HSO ₃ ⁻ | 2.28E-06 | 1.34E-06 | Troilite | | 4.835 |
| MgAd ⁺ | 1.15E-06 | 6.73E-07 | Pyrrhotite | | 4.762 |
| CaAc ⁺ | 8.66E-07 | 5.08E-07 | Fe(OH) ₂ | | 3.992 |
| CaPO ₄ ⁻ | 7.18E-07 | 4.21E-07 | Brucite | | 2.855 |

| LAP+PILA+MONT 50C sans correction alcalinité | | | | | |
|--|----------|----------|---|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Na ⁺ | 0.75033 | 0.48832 | FeDo(aq) | 9.27E-07 | 1.18E-06 |
| SO ₄ [2-] | 0.17933 | 0.023614 | FeOH ⁺ | 6.58E-07 | 4.28E-07 |
| Ad ⁻ | 0.10165 | 0.066153 | Fe(OH) ₂ (aq) | 6.57E-07 | 8.34E-07 |
| Do[2-] | 0.088551 | 0.01166 | CaAc ⁺ | 4.65E-07 | 3.02E-07 |
| CH ₃ S ⁻ | 0.027319 | 0.016258 | H ₂ S(aq) | 2.56E-07 | 3.25E-07 |
| HS ⁻ | 0.024248 | 0.015143 | MgPO ₄ ⁻ | 2.41E-07 | 1.57E-07 |
| OH ⁻ | 0.021067 | 0.013156 | CaNO ₃ ⁺ | 1.11E-07 | 7.19E-08 |
| S[2-] | 0.011921 | 2.05E-03 | KOH(aq) | 1.05E-07 | 1.33E-07 |
| NH ₃ (aq) | 0.01017 | 0.012906 | FePO ₄ ⁻ | 7.77E-08 | 5.06E-08 |
| Cl ⁻ | 9.51E-03 | 5.66E-03 | H ₂ SO ₃ ⁻ | 4.32E-08 | 2.81E-08 |
| Ac ⁻ | 2.25E-03 | 1.52E-03 | CaOx | 4.05E-08 | 5.14E-08 |
| SO ₃ [2-] | 1.90E-03 | 2.89E-04 | CaCl ⁺ | 4.02E-08 | 2.62E-08 |
| CH ₃ SH(aq) | 1.31E-03 | 1.67E-03 | KCl(aq) | 3.56E-08 | 4.52E-08 |
| NO ₃ ⁻ | 1.22E-03 | 7.27E-04 | Fe[2 ⁺] | 2.60E-08 | 5.52E-09 |
| S ₂ O ₃ [2-] | 1.10E-03 | 1.45E-04 | FeSO ₄ (aq) | 1.63E-08 | 2.06E-08 |
| NaOH(aq) | 8.15E-04 | 1.03E-03 | Fe(OH) ₄ [2-] | 1.52E-08 | 2.00E-09 |
| NaCl(aq) | 4.44E-04 | 5.64E-04 | MgAc ⁺ | 1.46E-08 | 9.49E-09 |
| CaDo(aq) | 2.96E-04 | 3.75E-04 | HAd(aq) | 1.29E-08 | 1.64E-08 |
| K ⁺ | 2.64E-04 | 1.57E-04 | CaHPO ₄ (aq) | 7.88E-09 | 1.00E-08 |
| Ca[2 ⁺] | 9.32E-05 | 1.97E-05 | FeAd ⁺ | 7.18E-09 | 4.67E-09 |
| CaSO ₄ (aq) | 6.01E-05 | 7.62E-05 | MgCl ⁺ | 2.63E-09 | 1.71E-09 |
| KSO ₄ ⁻ | 5.08E-05 | 3.31E-05 | MgOx | 2.11E-09 | 2.68E-09 |
| CaAd ⁺ | 3.79E-05 | 2.47E-05 | | | |
| NH ₄ ⁺ | 3.23E-05 | 1.82E-05 | pH | | 11.39 |
| Ox[2-] | 1.73E-05 | 1.60E-06 | Force ionique | | 1.035 |
| PO ₄ [3-] | 1.68E-05 | 1.54E-07 | Elec. Imb. (eq/l) | | -0.0021533 |
| MgDo(aq) | 1.55E-05 | 1.96E-05 | Min Sursaturé | | SI (logQ/K) |
| Fe(OH) ₃ ⁻ | 1.25E-05 | 8.14E-06 | Hydroxylapatite | | 9.792 |
| CaPO ₄ ⁻ | 9.42E-06 | 6.13E-06 | Pyrite | | 8.533 |
| HPO ₄ [2-] | 7.00E-06 | 9.21E-07 | Troilite | | 5.258 |
| NaHPO ₄ ⁻ | 5.75E-06 | 3.74E-06 | Pyrrhotite | | 5.166 |
| MgSO ₄ (aq) | 3.60E-06 | 4.57E-06 | Whitlockite | | 2.526 |
| Mg[2 ⁺] | 1.31E-06 | 3.75E-07 | FeO | | 2.427 |
| MgAd ⁺ | 1.09E-06 | 7.06E-07 | Fe(OH) ₂ | | 1.906 |
| CaOH ⁺ | 1.05E-06 | 6.84E-07 | Brucite | | 1.554 |

| LAP+PILA+MONT 50C (correction alcalinité/pH pour Mont) | | | | | |
|--|------------|------------|---|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Na ⁺ | 0.84416 | 0.54915 | KOH(aq) | 4.87E-07 | 6.33E-07 |
| SO ₄ [2-] | 0.17933 | 0.022831 | CaAc ⁺ | 4.77E-07 | 3.10E-07 |
| Ad ⁻ | 0.10165 | 0.066124 | MgPO ₄ ⁻ | 3.18E-07 | 2.07E-07 |
| OH ⁻ | 0.10011 | 0.062379 | Fe(OH) ₂ (aq) | 1.58E-07 | 2.05E-07 |
| Do[2-] | 0.088562 | 0.011275 | CaNO ₃ ⁺ | 1.13E-07 | 7.34E-08 |
| CH ₃ S ⁻ | 0.028352 | 0.016796 | Fe(OH) ₄ [2-] | 8.68E-08 | 1.10E-08 |
| S[2-] | 0.025469 | 0.0042835 | CaCl ⁺ | 4.09E-08 | 2.66E-08 |
| HS ⁻ | 0.0107 | 0.006667 | CaOx | 3.85E-08 | 5.01E-08 |
| NH ₃ (aq) | 0.010195 | 0.013262 | KCl(aq) | 3.45E-08 | 4.49E-08 |
| Cl ⁻ | 0.0094739 | 0.0056125 | FeOH ⁺ | 3.41E-08 | 2.22E-08 |
| NaOH(aq) | 0.0042404 | 0.0055161 | H ₂ S(aq) | 2.32E-08 | 3.02E-08 |
| Ac ⁻ | 0.0022546 | 0.0015222 | MgAc ⁺ | 1.53E-08 | 9.96E-09 |
| SO ₃ [2-] | 0.0018997 | 0.00028064 | FeDo(aq) | 9.57E-09 | 1.25E-08 |
| NO ₃ ⁻ | 0.001221 | 0.00072336 | H ₂ SO ₃ ⁻ | 8.87E-09 | 5.77E-09 |
| S ₂ O ₃ [2-] | 0.0011038 | 0.00014052 | MgCl ⁺ | 2.73E-09 | 1.78E-09 |
| NaCl(aq) | 0.00048295 | 0.00062825 | HAd(aq) | 2.66E-09 | 3.46E-09 |
| CaDo(aq) | 0.00028596 | 0.00037198 | CaHPO ₄ (aq) | 2.09E-09 | 2.72E-09 |
| CH ₃ SH(aq) | 0.0002789 | 0.0003628 | MgOx | 2.06E-09 | 2.68E-09 |
| K ⁺ | 0.00026501 | 0.000157 | FePO ₄ ⁻ | 1.07E-09 | 6.98E-10 |
| Ca[2 ⁺] | 9.71E-05 | 2.02E-05 | HDo ⁻ | 4.00E-10 | 2.60E-10 |
| CaSO ₄ (aq) | 5.81E-05 | 7.56E-05 | KHPO ₄ ⁻ | 3.56E-10 | 2.32E-10 |
| KSO ₄ ⁻ | 4.91E-05 | 3.20E-05 | Fe[2 ⁺] | 2.90E-10 | 6.04E-11 |
| CaAd ⁺ | 3.89E-05 | 2.53E-05 | FeSO ₄ (aq) | 1.68E-10 | 2.19E-10 |
| PO ₄ [3-] | 2.32E-05 | 1.95E-07 | pH | | 12.07 |
| Ox[2-] | 1.73E-05 | 1.52E-06 | Force ionique | | 1.142 |
| MgDo(aq) | 1.53E-05 | 1.99E-05 | Elec. Imb. (eq/l) | | -0.0019661 |
| Fe(OH) ₃ ⁻ | 1.46E-05 | 9.50E-06 | Min Sursaturé | | SI (logQ/K) |
| CaPO ₄ ⁻ | 1.22E-05 | 7.92E-06 | Hydroxylapatite | | 10.82 |
| NH ₄ ⁺ | 7.05E-06 | 3.93E-06 | Pyrite | | 5.777 |
| CaOH ⁺ | 5.11E-06 | 3.33E-06 | Troilite | | 3.617 |
| MgSO ₄ (aq) | 3.56E-06 | 4.63E-06 | Pyrrhotite | | 3.525 |
| HPO ₄ [2-] | 1.92E-06 | 2.45E-07 | Brucite | | 2.933 |
| NaHPO ₄ ⁻ | 1.72E-06 | 1.12E-06 | Whitlockite | | 2.76 |
| Mg[2 ⁺] | 1.38E-06 | 3.93E-07 | FeO | | 1.818 |
| MgAd ⁺ | 1.14E-06 | 7.40E-07 | Fe(OH) ₂ | | 1.297 |

| LAP+PILA+SOBEGI 50C | | | | | |
|---------------------|------------|------------|-------------------|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Cl[-] | 0.55543 | 0.34034 | FeHPO4(aq) | 3.91E-07 | 4.58E-07 |
| NH4[+] | 0.50478 | 0.29557 | FeSO4(aq) | 3.86E-07 | 4.51E-07 |
| Na[+] | 0.14611 | 0.096306 | FePO4[-] | 3.82E-07 | 2.52E-07 |
| HS[-] | 0.040635 | 0.02589 | MgHPO4(aq) | 3.33E-07 | 3.89E-07 |
| NH3(aq) | 0.039576 | 0.046291 | CaNO3[+] | 1.21E-07 | 7.97E-08 |
| CH3SH(aq) | 0.034215 | 0.04002 | PO4[3-] | 1.15E-07 | 1.58E-09 |
| Ac[-] | 0.019333 | 0.013128 | MgPO4[-] | 7.26E-08 | 1.78E-08 |
| SO3[2-] | 0.010963 | 0.0019019 | FeOH[+] | 6.98E-08 | 4.60E-08 |
| SO4[2-] | 0.0068675 | 0.0010577 | HOx[-] | 3.92E-08 | 2.40E-08 |
| NaCl(aq) | 0.0057119 | 0.006681 | NaOH(aq) | 3.84E-08 | 4.49E-08 |
| K[+] | 0.0052127 | 0.003194 | H[+] | 2.52E-08 | 1.85E-08 |
| S2O3[2-] | 0.0027755 | 0.00042746 | HSO4[-] | 5.94E-09 | 3.91E-09 |
| H2S(aq) | 0.0021555 | 0.0025212 | FeCl4[2-] | 4.36E-09 | 6.71E-10 |
| H5O2[-] | 0.0012773 | 0.00084102 | CaF2O7[2-] | 1.00E-09 | 3.04E-10 |
| Ca[2+] | 0.00064142 | 0.00014768 | P2O7[4-] | 1.87E-09 | 8.57E-13 |
| Ox[2-] | 0.0004206 | 4.84E-05 | HP2O7[3-] | 1.84E-09 | 2.51E-11 |
| HP04[2-] | 0.00077717 | 4.77E-05 | SO7(aq) | 1.80E-09 | 7.11E-09 |
| NO3[-] | 0.00017564 | 0.00010762 | CaOH[+] | 1.71E-09 | 1.13E-09 |
| CH3S[-] | 0.00014016 | 8.61E-05 | MgP2O7[2-] | 1.38E-09 | 2.12E-10 |
| NaHPO4[-] | 5.19E-05 | 3.42E-05 | FeCl2(aq) | 1.33E-09 | 1.55E-09 |
| KCl(aq) | 4.73E-05 | 5.53E-05 | HCl(aq) | 1.10E-09 | 1.29E-09 |
| KSO4[-] | 4.57E-05 | 3.01E-05 | H2SO3(aq) | 9.10E-10 | 1.06E-09 |
| Mg[2+] | 3.74E-05 | 1.12E-05 | KOH(aq) | 5.11E-10 | 5.98E-10 |
| CaAc[+] | 2.98E-05 | 1.95E-05 | NaP2O7[3-] | 4.49E-10 | 6.13E-12 |
| CaSO4(aq) | 2.18E-05 | 2.55E-05 | Na2P2O7[2-] | 3.05E-10 | 4.69E-11 |
| H2PO4[-] | 1.82E-05 | 1.20E-05 | NaHP2O7[2-] | 1.49E-10 | 2.30E-11 |
| CaCl[+] | 1.78E-05 | 1.18E-05 | KP2O7[3-] | 5.53E-11 | 7.55E-13 |
| ArH(aq) | 1.77E-05 | 1.48E-05 | H3PO4(aq) | 3.77E-11 | 4.41E-11 |
| Fe[2+] | 1.17E-05 | 2.69E-06 | Fe(OH)2(aq) | 1.69E-11 | 1.97E-11 |
| CaOx | 9.95E-06 | 1.10E-05 | NH4SO4[-] | 1.20E-11 | 7.80E-12 |
| MgSO4(aq) | 5.24E-06 | 6.13E-06 | H2P2O7[2-] | 1.07E-11 | 1.65E-12 |
| MgCl[+] | 4.67E-06 | 3.08E-06 | KHSO4(aq) | 1.02E-12 | 1.19E-12 |
| OH[-] | 4.55E-06 | 2.90E-06 | HNO3(aq) | 1.52E-13 | 1.78E-13 |
| S[2-] | 4.01E-06 | 7.73E-07 | | | |
| MgAc[+] | 3.72E-06 | 2.45E-06 | pH | | 7.733 |
| CaCl2(aq) | 3.77E-06 | 3.77E-06 | Force ionique | | 0.6806 |
| CaHPO4(aq) | 2.96E-06 | 3.46E-06 | Elec. Imb. (eq/l) | | -0.0021403 |
| MgOx | 2.08E-06 | 2.44E-06 | Min Sursaturé | | SI (logQ/K) |
| FeOx | 2.04E-06 | 2.38E-06 | Pyrite | | 12.21 |
| KHP04[-] | 1.25E-06 | 8.21E-07 | Hydroxylapatite | | 4.531 |
| FeCl[+] | 1.15E-06 | 7.58E-07 | Troilite | | 4.522 |
| FeAc[+] | 1.06E-06 | 6.98E-07 | Pyrrhotite | | 4.431 |
| CaPO4[-] | 7.10E-07 | 4.60E-07 | Whitlockite | | 1.100 |

| SOBEGI 50°C | | | | | |
|-------------|----------|----------|-------------------|----------|-------------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| Cl[-] | 1.5244 | 0.8906 | MgHPO4(aq) | 5.10E-07 | 7.72E-07 |
| NH4[+] | 1.4886 | 0.81546 | CaNO3[+] | 4.85E-07 | 3.19E-07 |
| Na[+] | 0.18208 | 0.12001 | CaPO4[-] | 4.07E-07 | 2.68E-07 |
| Ac[-] | 0.04732 | 0.032574 | S[2-] | 3.99E-07 | 6.20E-08 |
| SO3[2-] | 0.020243 | 2.71E-03 | FeCl4[2-] | 3.24E-07 | 3.64E-08 |
| NH3(aq) | 0.018373 | 0.027387 | HOx[-] | 3.20E-07 | 1.88E-07 |
| SO4[2-] | 0.017632 | 1.98E-03 | FePO4[-] | 1.49E-07 | 9.79E-08 |
| CH3SH(aq) | 0.016009 | 0.023863 | H[+] | 1.01E-07 | 8.63E-08 |
| H5O2[-] | 0.015455 | 9.60E-03 | PO4[3-] | 9.30E-08 | 5.40E-10 |
| NaCl(aq) | 0.014746 | 0.021982 | HP2O7[3-] | 5.24E-08 | 3.09E-10 |
| K[+] | 0.013737 | 8.10E-03 | HSO4[-] | 5.19E-08 | 3.42E-08 |
| HSO3[-] | 0.008481 | 5.59E-03 | SO2(aq) | 4.38E-08 | 6.53E-08 |
| S2O3[2-] | 5.66E-03 | 6.36E-04 | MgPO4[-] | 3.09E-08 | 2.04E-08 |
| H2S(aq) | 2.95E-03 | 4.40E-03 | P2O7[4-] | 2.38E-08 | 2.26E-12 |
| Ca[2+] | 1.22E-03 | 2.43E-04 | H2SO3(aq) | 2.21E-08 | 3.30E-08 |
| Ox[2-] | 1.13E-03 | 8.14E-05 | FeOH[+] | 1.67E-08 | 1.10E-08 |
| HPO4[2-] | 6.10E-04 | 6.93E-05 | CaF2O7[2-] | 1.17E-08 | 1.32E-09 |
| NO3[-] | 4.45E-04 | 2.62E-04 | HCl(aq) | 1.07E-08 | 1.59E-08 |
| KCl(aq) | 2.49E-04 | 3.70E-04 | FeCl2(aq) | 8.11E-09 | 1.21E-08 |
| KSO4[-] | 2.17E-04 | 1.43E-04 | NaOH(aq) | 8.06E-09 | 1.20E-08 |
| H2PO4[-] | 1.38E-04 | 9.08E-05 | MgP2O7[2-] | 6.08E-09 | 6.84E-10 |
| CaAc[+] | 1.21E-04 | 7.97E-05 | NaP2O7[3-] | 3.42E-09 | 2.02E-11 |
| AcH(aq) | 1.15E-04 | 1.72E-04 | NaHP2O7[2-] | 3.13E-09 | 3.52E-10 |
| NaHPO4[-] | 1.05E-04 | 6.92E-05 | Na2P2O7[2-] | 1.71E-09 | 1.92E-10 |
| CaCl[+] | 7.75E-05 | 5.11E-05 | H3PO4(aq) | 1.05E-09 | 1.56E-09 |
| CaSO4(aq) | 5.28E-05 | 7.87E-05 | KP2O7[3-] | 8.55E-10 | 5.05E-12 |
| Mg[2+] | 4.87E-05 | 1.37E-05 | H2P2O7[2-] | 8.42E-10 | 9.47E-11 |
| CaLi2(aq) | 2.90E-05 | 4.52E-05 | CaOH[+] | 6.03E-10 | 3.97E-10 |
| CaOx | 2.16E-05 | 3.22E-05 | KOH(aq) | 2.18E-10 | 3.25E-10 |
| CH3S[-] | 1.87E-05 | 1.10E-05 | NH4SO4[-] | 6.19E-11 | 4.08E-11 |
| Fe[2+] | 1.51E-05 | 3.01E-06 | KHSO4(aq) | 1.77E-11 | 2.65E-11 |
| MgCl[+] | 1.51E-05 | 9.93E-06 | HNO3(aq) | 1.35E-12 | 2.02E-12 |
| MgAc[+] | 1.13E-05 | 7.44E-06 | Fe(OH)2(aq) | 6.80E-13 | 1.01E-12 |
| MgSO4(aq) | 9.42E-06 | 1.40E-05 | | | |
| CaHPO4(aq) | 6.21E-06 | 9.25E-06 | pH | | 7.064 |
| KHPO4[-] | 5.13E-06 | 3.38E-06 | Force ionique | | 1.734 |
| FeCl[+] | 3.39E-06 | 2.23E-06 | Elec. Imb. (eq/l) | | 6.59E-05 |
| MgOx | 3.36E-06 | 5.00E-06 | Min Sursaturé | | SI (logQ/K) |
| FeOx | 3.00E-06 | 4.47E-06 | Pyrite | | 11.74 |
| FeAc[+] | 2.93E-06 | 1.93E-06 | Hydroxylapatite | | 3.568 |
| OH[-] | 9.92E-07 | 6.21E-07 | Troilite | | 3.474 |
| FeSO4(aq) | 6.34E-07 | 9.44E-07 | Pyrrhotite | | 3.302 |
| FeHPO4(aq) | 5.56E-07 | 8.29E-07 | Whitlockite | | 0.8977 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Schéma d'injection. Origine TEPF..... | 5 |
| Figure 2 : Représentation du système élémentaire. Pour une même porosité ($\Phi = 7.514\%$), la surface réactive totale initiale est d'autant plus grande que l'épaisseur de la fracture est faible. Dans ce travail, tous les calculs sont réalisés en prenant une épaisseur de 1 cm. | 6 |
| Figure 3 : Suivi de la minéralogie primaire au cours du temps exprimée en variation volumique (Δ cm ³ /kg d'eau porale). Gauche : étude Berger (2006), droite : cette étude. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C..... | 8 |
| Figure 4 : Suivi de la minéralogie secondaire au cours du temps exprimée en variation volumique (Δ cm ³ /kg d'eau porale). Gauche : étude Berger (2006) ; droite : cette étude. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C. Ces néominéraux précipitent à l'équilibre thermodynamique..... | 8 |
| Figure 5 : Evolution du pH au cours du temps. Le potentiel redox Eh n'a pas été calculé dans cette étude (à droite) car les aspects redox n'ont pas été pris en compte. L'eau porale est constituée du mélange LAP+PILA+MONT à 140°C..... | 9 |
| Figure 6 : Interprétation géométrique du système 1D. Vue d'ensemble..... | 11 |
| Figure 7 : Interprétation géométrique du système 1D. Section représentant l'alternance fractures/bandes de roche. Ce système n'est pas explicitement modélisé, mais il représente correctement la porosité et la surface réactive totale..... | 11 |
| Figure 8 : Profil de température avec l'éloignement au puits à différentes dates. Température initiale du réservoir = 140°C ; température d'injection = 50°C..... | 16 |
| Figure 9 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende). | 17 |
| Figure 10 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende). | 18 |
| Figure 11 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende). | 18 |
| Figure 12 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite et de pyrite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende). | 19 |
| Figure 13 : Motifs de dissolution de carbonates par injection d'acide suivant le nombre de Damköhler (nombre adimensionnel représentant le ratio de la vitesse de réaction sur le flux convectif). D'après Hoefner & Fogler (1989). | 22 |
| Figure 14 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange SOBEGI à 10 ans d'injection. De haut en bas : Fig. 14.a = cas de base (= Fig. 11) ; Fig. 14.b. = sensibilité à la température (140°C) ; Fig 14.c = sensibilité aux surfaces réactives (surfaces multipliées par 100). Les échelles sont différentes dans chaque figure (voir légende). | 23 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Liste des réactions impliquant les espèces Ac^- , Ox^{2-} , Ad^- et Do^{2-} et constantes d'équilibre utilisées. | 4 |
| Tableau 2 : Propriétés cinétiques des minéraux du calcaire à algues. Hypothèses reprises de l'étude Berger (2006). Les surfaces réactives correspondent aux surfaces géométriques..... | 7 |
| Tableau 3 : Proportions minéralogiques initiales du calcaire à algues et de la dolomite de Mano prises pour les simulations 1D. Les surfaces indiquées sont les surfaces réactives..... | 12 |
| Tableau 4 : Constantes cinétiques à 140°C et 50°C et énergies d'activation..... | 13 |
| Tableau 5 : Mélanges d'effluents et débits traités dans les simulations..... | 14 |
| Tableau 6 : Modifications maximales de porosité et leur extension après 10 et 40 ans d'injection. L'ensemble du système (calcaire à algues + dolomie de Mano) est pris en compte..... | 20 |

*

Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude

Liste des fichiers natifs du rapport

| Nom fichier | Format/Type du fichier | Logiciel version | Média | Auteur/Entité | Date |
|-------------|------------------------|------------------|-------|---------------|------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Liste des bases de données et applicatifs utilisés dans l'étude

| Nom fichier | Format/Type du fichier | Logiciel version | Média | Auteur/Entité | Date |
|-----------------------------|------------------------|------------------|-------|---------------|------|
| MONT_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D10861.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D40308.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SOBEGI.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D10861+D40380+MONT_140C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D10861+D40380+MONT_bis.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D10861+D40380+MONT.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| D10861+D40380+SOBEGI.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| batch2.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| batch2_bis.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| Therm_av_CL | .txt | GEM 2009.10 | | | |
| D10861+D40308+SOBEGI.htc | .txt | HYTEC 3.6 | | | |
| SOBEGI.htc | .txt | HYTEC 3.6 | | | |



Pau, avril 2012

Exploration & Production

DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-052
Pierre CHIQUET

**France – Lacq profond
Injection d’eaux industrielles
dans le C4000. Modélisations
chimie-transport dans le cadre
du projet post-2013**

*

N° Archives : *

La reproduction partielle ou totale et la diffusion, sans l’autorisation écrite de Total, sont strictement interdites.

Adresses postales

Paris 2, place Jean Millier - La Défense 6 - 92078 Paris La Défense Cedex FRANCE
Pau 64018 - Pau Cedex FRANCE

Téléphone : 33 (0)1 47 44 45 46
Téléphone : 33 (0)5 59 83 40 00

Identification page

| | | |
|-------------------------|--|---|
| Title | : France – Lacq profond. Injection d'eaux industrielles dans le C4000. Modélisations chimie-transport dans le cadre du projet post-2013. | |
| Author(s) | : Pierre CHIQUET | |
| Direction | : EXPLORATION | |
| Date | : Avril 2012 |  |
| Formal commercial order | : *RFS 30T11CH890E22 | |
| Chronological reference | : EP/EXPLO/TE/ISS/RGM R11-052 | Verified by : F. UMBHAUER. |
| N° Archives | : * | Validated by : J.C. NAVARRE  |

| | | | |
|------------------------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| Domain (general topics) : | 1 - *Reservoir | 2 - *Géochimie | 3 - * |
| Keywords (specific topics) : | 1 - *Lacq | 2 - *Crétacé 4000 | 3 - *Effluents industriels |
| | 4 - * | 5 - * | 6 - * |

| | | | |
|--------------------------------|------------|-------------------------------------|--|
| Country ⁽¹⁾ : | *France | Field ⁽¹⁾ : | *Lacq Profond |
| Region ⁽¹⁾ : | *Aquitaine | Well ⁽¹⁾ : | *LA102, LA109 |
| Basin ⁽¹⁾ : | *Aquitain | Geophysical Survey ⁽¹⁾ : | * |
| Licence/Block ⁽¹⁾ : | * | | ⁽¹⁾ several names, if necessary |

| |
|-------------------------------|
| Comments (free description) : |
|-------------------------------|

Distribution list

| Distribution of complete report | | |
|---------------------------------|-----------------------------|--|
| 2 copies | DGEP/GSR/ASI/GDM (Archives) | (1 ex papier + 1 ex format PDF) |
| 1 ex | DEV/GIS/RES | V. Lepoivre (1 ex papier + 1 CD avec fichiers de simulation) |
| 1 ex | ECA/TEPF/DG/SPG | D. Gazaniol (1 ex papier) |
| 1 ex | ECA/TEPF/SOBEGI | G. Le Moal (1 ex papier) |
| 1 ex | EXPLO/TE/ISS/RGM, | F. Umbhauer, P. Chiquet (2 ex papier) |
| 1 ex | SCR/RD/MGR | C. Prinnet (1 ex papier) |
| 1 ex | DEV/GIS/CO2STK | S. Thibeau (1 ex papier) |
| Copies of reduced report | | |
| 1 copy | EP/EXPLO/TE | G. Bitoun/H. Coutrix |
| 1 copy | EP/EXPLO/TE/ISS | J.C. Navarre/P. Sorriaux |
| 1 copy | EP/EXPLO/TE/ISS/RGM | F. Umbhauer/P. Chiquet |

Résumé/Conclusion

Les opérations post-2013 du projet C4000 envisagent d'injecter trois types d'effluents dans Lacq profond : les eaux de la plate-forme industrielle de Lacq (**PILA**) produites par Arkema, les eaux liées à la production de Lacq profond (**LAP**) et des mélanges issus d'industries basées sur la plateforme **SOBEGI** de Mourenx. **Ces eaux sont différentes des eaux historiques étudiées dans le rapport RGM 2011-051 (Chiquet, 2011).**

Deux scénarios d'injection prévus sont :

- l'injection conjointe de ces trois effluents par le puits LA109,
- l'injection de LAP+PILA dans LA102 et SOBEGI dans LA109.

Ces deux puits, qui se situent dans des blocs isolés de Lacq profond (voir coupe en annexe 3), sont d'anciens puits producteurs précocement fermés à cause d'arrivées d'eaux. Les formations rencontrées sont le calcaire à algues (Barrémien) puis la dolomie de Mano (Jurassique)

La réactivité du calcaire à algues et de la dolomie de Mano vis-à-vis de ces effluents a été étudiée suivant un modèle phénoménologique 1D de 200 mètres qui représente un couloir de fracturation typique traversé par le puits et dans lequel circulent les eaux. La taille caractéristique des fractures est de 1 cm et les surfaces réactives représentent un centième de la surface géométrique définie par les épontes de fracture. La température à laquelle les réactions chimiques prennent place est fixée à 50°C (Chiquet, 2011).

Les effluents étudiés étant tous largement sous-saturés vis-à-vis des minéraux présents dans le réservoir, les cinétiques de dissolution ne dépendent ni du type de mélange, ni des débits, mais uniquement des constantes cinétiques et des surfaces réactives.

Compte tenu des forts débits et, en proportion, des faibles cinétiques, la composition des effluents reste homogène le long du système, d'où des dissolutions elles-mêmes homogènes dans le calcaire à algues et dans la dolomie de Mano.

Les précipitations de néominéraux sont faibles. Les augmentations de porosité sont essentiellement liées aux dissolutions de calcite, qui est l'espèce la plus dissoute car elle majore les produits « constante cinétique x surface réactive ».

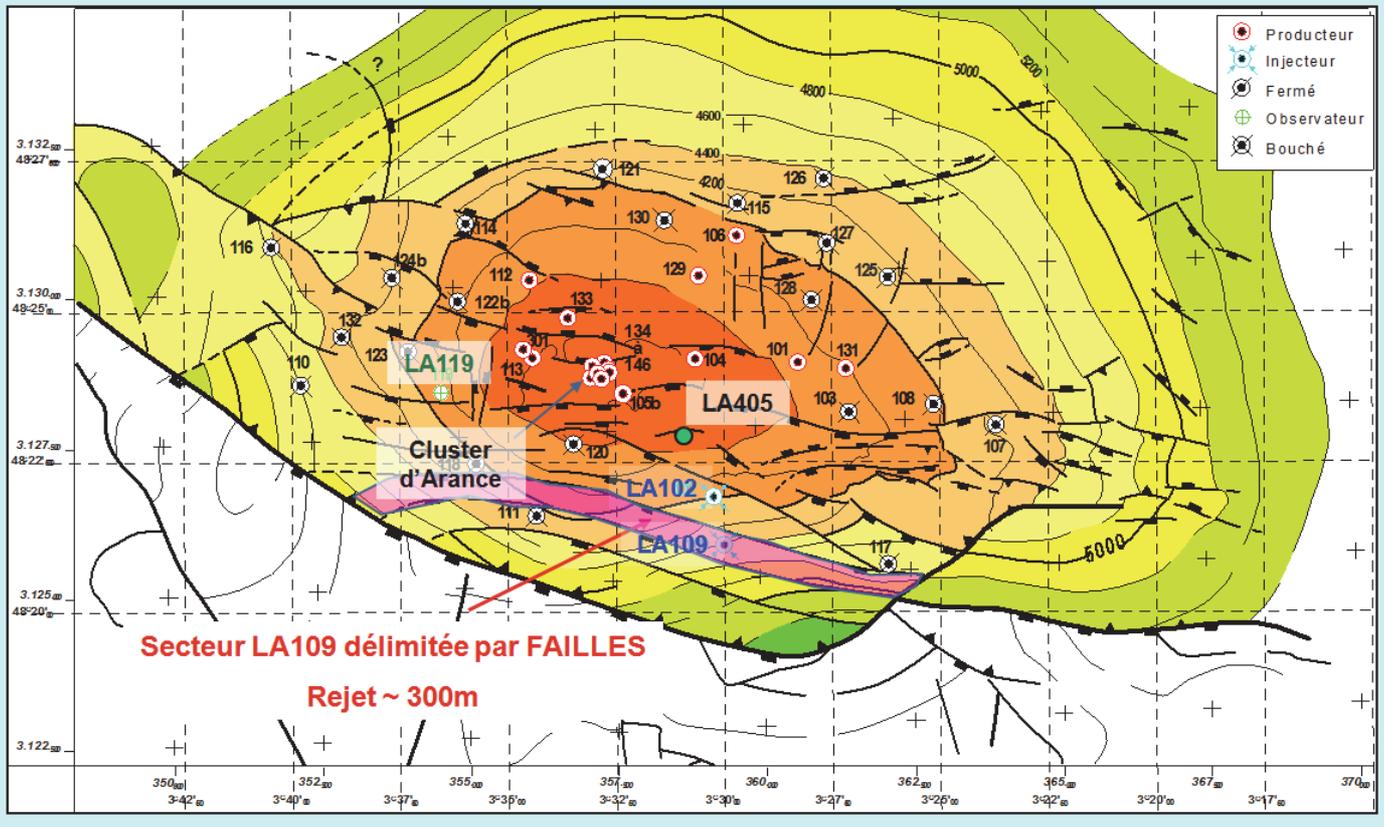
Quel que soit le scénario, la porosité, initialement estimée à 7.515% atteint :

- 7.74% dans le calcaire à algues ($\Delta\Phi \sim +0.2\%$) et 7.53% ($\Delta\Phi \sim +0.015\%$) dans la dolomie de Mano après 10 ans d'injection.
- 8.42% ($\Delta\Phi \sim +0.9\%$) et 7.58% ($\Delta\Phi \sim +0.07\%$) dans les mêmes zones après 40 ans d'injection.

Avec les hypothèses utilisées dans cette étude, notamment pour les surfaces réactives, ces augmentations de porosité restent faibles au regard des volumes injectés et ne présentent pas de risque pour l'intégrité du calcaire à algues et de la dolomie de Mano dans les blocs concernés par les puits LA109 et LA107.

LACQ Profond

Isobathes au toit du BARREMIEN (interprétation L. Anquelle & DEPF/EXP 1995, sismique 3D 1993)



Sommaire

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction..... | 2 |
| 2 | Caractérisation des effluents | 2 |
| 2.1 | Origine | 2 |
| 2.2 | Construction thermodynamique des eaux..... | 3 |
| 3 | Modélisations chimie-transport | 5 |
| 3.1 | Géométrie et paramètres thermocinétiques | 5 |
| 3.2 | Résultats..... | 8 |
| 4 | Annexes | 14 |
| 4.1 | Spéciation des eaux aux conditions labo | 14 |
| 4.2 | Spéciation des mélanges aux conditions fond (50°C)..... | 18 |
| 4.3 | Coupe géologique situant les puits LA102 et LA109..... | 19 |
| | Liste des références | 20 |
| | Liste des Figures | 20 |
| | Liste des Tableaux..... | 20 |
| | Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude | 21 |

1 Introduction

Ce rapport étudie la compatibilité géochimique entre deux niveaux crétacés de Lacq profond (C4000) et des effluents industriels issus des pôles pétrochimiques de Lacq et de Mourenx. La géométrie du modèle phénoménologique et les grandes hypothèses géochimiques utilisées ont été définies dans le rapport RGM 2011-051 (Chiquet, 2011) dédié aux compositions « historiques » (voir annexes du rapport RGM 2011-051 pour ces compositions historiques).

Les opérations post-2013 du projet C4000 envisagent de nouvelles compositions chimiques et des débits plus faibles d'un facteur trois auxquels nous nous intéressons ici.

2 Caractérisation des effluents

2.1 Origine

Trois types d'effluents sont envisagés dans les injections post-2013 :

- Des eaux de Lacq Profond (**LAP**) : il s'agit essentiellement d'eaux de condensation et de traitement du gaz de Lacq. Ces eaux, légèrement acides, ont une faible salinité et contiennent essentiellement des sulfures (H_2S) et des mercaptans (CH_3SH) naturellement associés au gaz de Lacq.
- Des eaux produites sur la plate forme industrielle **SOBEGI** de Mourenx. Ces eaux comprennent :
 - Les eaux d'Arkema, caractérisées par une forte salinité en chlorure de sodium et chlorure d'ammonium.
 - Les eaux de l'usine de régénération de solvants SPEICHIM chargées en acétate de sodium (CH_3COONa).
 - Les eaux de SBS (produits pharmaceutiques, parfum) associées à des sulfites (SO_3^{2-} , HSO_3^-) et des sulfates.
- Les eaux d'Arkema Lacq, produites sur la plateforme industrielle de Lacq (**PILA**) : ces eaux, peu salées, sont modérément acides par la présence de sulfures et de mercaptans.

Le schéma d'injection prévu est représenté en table 1. Deux scénarios possibles ont été étudiés :

- Scénario 1 : injection conjointe des effluents LAP, PILA et SOBEGI par le puits LA109.
- Scénario 2 : injection commune de LAP et PILA par le puits LA102 et injection séparée de SOBEGI en utilisant le puits LA109.

| Effluents | Nbre analyses en 2010 | Débit m ³ /j | | Scénario 1 | | Scénario 2 | |
|-----------|-----------------------|----------------------------|-------|------------|-------|------------|---|
| | | | | LA109 | LA102 | LA109 | |
| LAP | UTG D40308 | 2-3 | 53.5 | 55 | X | X | |
| | Torche BP4.3 | 1-2 | 1.5 | | | | |
| PILA | Arkema Lacq | 7-9 | 30 | | X | X | |
| SOBEGI | Arkema Mourenx | 1 | 123.7 | | | | |
| | SPEICHIM | 5-8 | 8.2 | 135 | X | | X |
| | SBS | 1-2 | 3.1 | | | | |

Tableau 1 : Schéma des injections. Présentation des deux scenarios.

Les compositions chimiques des eaux avant mélange ont été fournies par le laboratoire de chimie des eaux du PRDML (Pôle de Recherche et de Développement de Mont/Lacq, TOTAL Petrochemicals) sous forme d'une feuille Excel nommée LCE10-102 & 208. Plusieurs échantillons par unité ont été prélevés sur la période août 2010 – décembre 2010.

2.2 Construction thermodynamique des eaux

Les hypothèses utilisées dans ces calculs sont détaillées dans le rapport RGM 2011-051 (Chiquet, 2011). Ces hypothèses sont brièvement rappelées ci-dessous :

2.2.1 Base de données chimiques

La spéciation des eaux et de leurs mélanges, aux conditions laboratoire et aux conditions fond ont été évaluées avec le logiciel CHESS et la base de données eq36.tdb. Le modèle d'activité choisi pour tenir compte de la non-idéalité de la solution est celui du B-dot.

Les équilibres redox ne sont pas pris en compte en raison de l'impossibilité de fédérer, aux conditions laboratoire, les différents couples redox autour d'un potentiel commun.

La base de données eq36.tdb a été complétée avec les espèces organiques suivantes :

- Les espèces dérivées de l'acide acétique, H₃C-COOH, noté AcH(aq)
 - base conjuguée : Ac⁻
 - complexes : CaAc⁺, FaAc⁺, MgAc⁺, NH₄Ac
- Les espèces dérivées de l'ion oxalate, ⁻OOC-COO⁻, noté Ox²⁻
 - acides conjugués : HOx⁻, H₂Ox
 - complexes : AlOx⁺, CaOx, FeOx, FeOx⁺, MgOx
- Le méthylmercaptan CH₃SH et sa base conjuguée CH₃S⁻.

2.2.2 Eaux aux conditions laboratoire

Les compositions des eaux aux conditions laboratoire sont détaillées en annexe 4.1. Les compositions expérimentales sont déduites de moyennes issues de prélèvements opérés de septembre à décembre 2010 sur les unités industrielles présentées en tableau 1

Pour la modélisation de ces eaux, aucune précipitation n'est autorisée dans les calculs de spéciation des eaux aux conditions laboratoire. Il s'agit d'une hypothèse volontairement conservatrice qui revient à maximiser les dépôts dans le réservoir et les risques de colmatage associés.

Dans ces calculs, les espèces aqueuses dosées sont déclarées en « total » c'est-à-dire de façon indifférenciée entre acide/base conjuguée ou ion/complexe. La répartition entre espèces de la même famille est la résultante du calcul du pH et de l'activité des espèces aqueuses.

Les données brutes ont parfois été ajustées pour satisfaire, lorsque cela est possible, les 3 contraintes suivantes :

- **L'électroneutralité** en modifiant la concentration d'une espèce aqueuse peu ou pas réactive comme Na^+ ou Cl^- .
- **L'alcalinité**, qui exprime la capacité d'une eau à neutraliser un acide. Numériquement, cette variable est calculée en réalisant une titration fictive en HCl depuis le pH initial (mesure labo) jusqu'à $\text{pH} = 4.2$. L'alcalinité, exprimée en équivalent par litre (eq/l), représente le nombre de mole de HCl nécessaire à cette baisse de pH.

Lorsque l'écart entre alcalinité mesurée et simulée est trop fort, nous avons ajusté les propriétés de l'eau en corrigeant suivant les cas :

- Le pH qui d'une part influe sur la charge en ions H^+ et OH^- mais aussi sur les équilibres acidobasiques : ex. augmenter le pH peu permet de passer du domaine de stabilité de NH_4^+ vers $\text{NH}_3(\text{aq})$. Lorsque le pH est très proche du pK de cet équilibre, une faible rectification du pH peut avoir une forte influence sur l'alcalinité.
 - La concentration d'un acide ou d'une base.
- **L'azote total** en modifiant les concentrations en ammonium ($\text{NH}_3(\text{aq})$, NH_4^+) et en nitrates (NO_3^-).

Les modifications effectuées pour tenter de respecter ces 3 propriétés sont précisées dans les tableaux de l'annexe 1.

L'électroneutralité, l'alcalinité et l'azote total, sont liés à toutes les espèces aqueuses dont certaines ont pu ne pas être correctement caractérisées. La fraction hydrocarbure, par exemple, n'a pas été prise en compte dans les simulations car sa composition exacte n'est pas reportée. Cette fraction contient probablement des acides organiques, qui contribuent à l'alcalinité et aux charges électriques, ainsi que des molécules organo-azotées prises en compte dans la détermination expérimentale de l'azote total. Ces trois conditions ne sont donc pas systématiquement honorées dans les calculs de spéciation des eaux présentés en annexe 1.

Les eaux de SPEICHIM et de Mourenx sont légèrement sursaturées en hydroxylapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Il peut s'agir d'un artefact lié à une surestimation des phosphates, du calcium ou du pH. En revanche, les eaux d'Arkema Lacq sont franchement sursaturées en pyrite (FeS_2) avec un indice de saturation $\text{SI} = \log(\text{Q}/\text{K}) = 10.66$. Comme indiqué dans le rapport RGM 2011-051, le fer dosé inclut probablement des espèces colloïdales qui n'appartiennent pas physiquement à la phase aqueuse. Dans une démarche conservatrice, nous avons maintenu ces indices de saturation pour ne pas minimiser les risques de colmatage dont l'innocuité dans le réservoir est confirmée par les résultats de l'étude.

2.2.3 Mélanges aux conditions fond

Ces mélanges sont présentés en annexes 2. **La température fond a été fixée à 50°C** suite aux études de propagation des flux thermiques réalisés dans le rapport RGM 2011-051. Tout comme au point précédent, la précipitation des minéraux sursaturés est bloquée.

Les mélanges SOBEGI et LAP+PILA+SOBEGI sont légèrement sursaturés en hydroxylapatite.

Les trois mélanges, SOBEGI, LAP+PILA et LAP+PILA+SOBEGI sont fortement sursaturés en pyrite et dans une moindre mesure en troilite et pyrrhotite, deux polymorphes de formule FeS.

3 Modélisations chimie-transport

3.1 Géométrie et paramètres thermocinétiques

Le transport est modélisé à l'aide d'un modèle 1D mis en place dans le rapport RGM 2011-051 (Chiquet, 2011). Ce modèle considère une zone fracturée de section 1x5 m partant du puits injecteur et traversant 100 m de calcaire à algues puis 100 m de dolomie de Mano. Une coupe géologique indiquant la situation réelle des puits injecteurs LA102 et LA109 est fournie en annexe 3.

La porosité initiale est fixée à 7.515% et la taille caractéristique des fractures à 1 cm (figures 1 et 2).

La surface des épontes de fracture définit une surface géométrique initiale. **La surface réactive totale des minéraux initiaux (calcite, dolomite, quartz, anhydrite) est fixée à 1% de cette surface géométrique.**

La surface réactive par minéral étant par hypothèse proportionnelle à la fraction volumique ($\frac{S_i(m^2/g)}{V_i(m^3/g)} = Cte, \forall i$ et \forall les quantités de i), nous avons appliqué le même ratio pour les néominéraux.

Les figures 1 et 2 illustrent la géométrie du modèle. Les compositions des roches ainsi que les caractéristiques cinétiques des minéraux, sont rappelées en table 2 et 3.

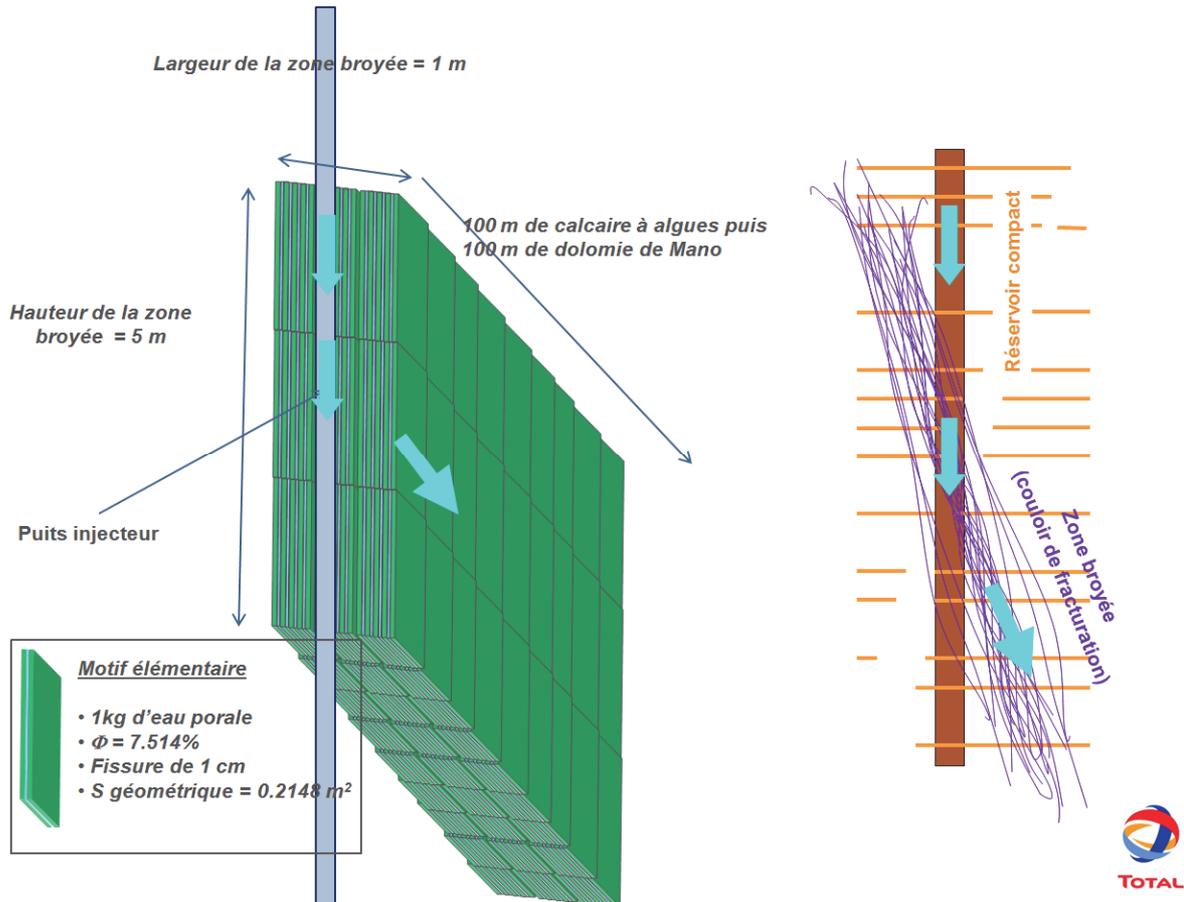


Figure 1 : Interprétation géométrique du système 1D. Vue d'ensemble.

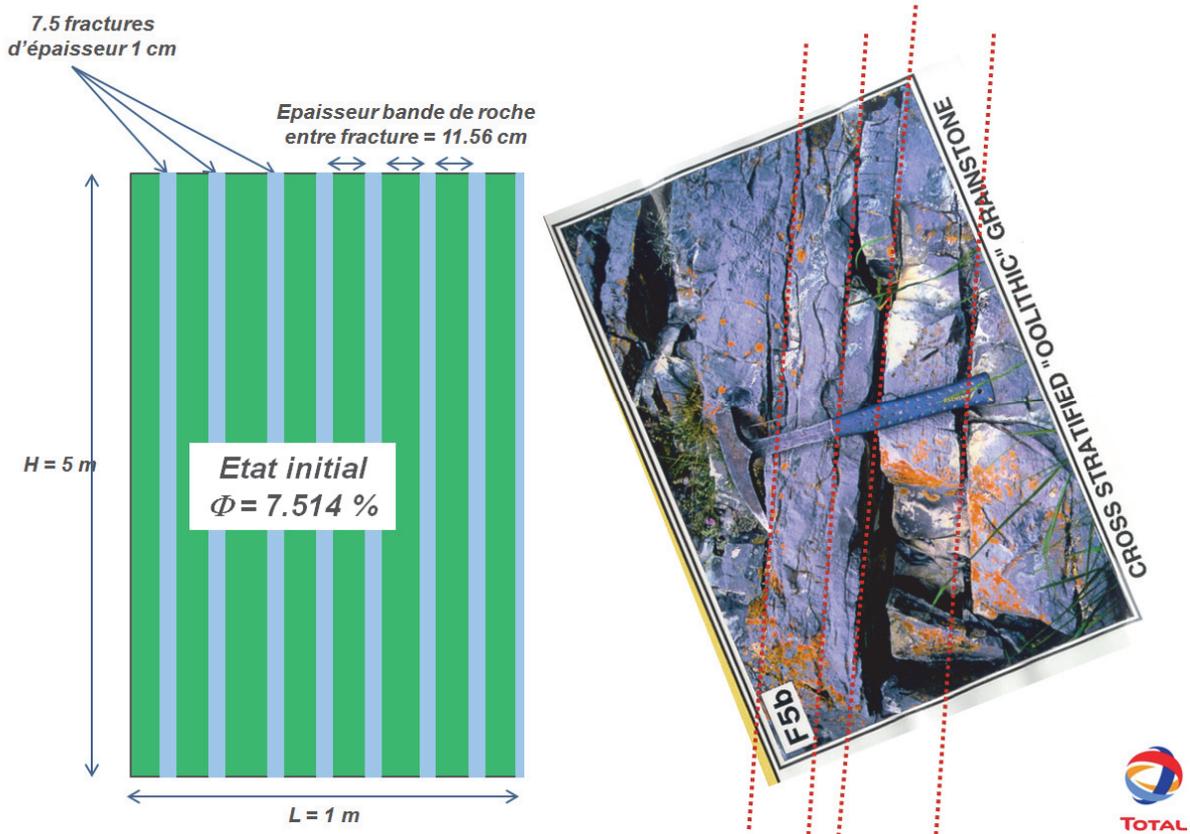


Figure 2 : Interprétation géométrique du système 1D. Section représentant l’alternance fractures/bandes de roche. Ce système n’est pas explicitement modélisé, mais il représente correctement la porosité et la surface géométrique totale. La surface réactive est ensuite fixée à 1% de la surface géométrique.

| | Φ (%) | S (m ² /kg d'eau) | $m_{\text{minéral}}/m_{\text{eau}}$ | % mass | mol/kg d'eau | Volume (l/kg d'eau) | % vol. | S (cm ² /kg eau) | S (cm ² /g minéral) | |
|-----------------|------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------|--------------|---------------------|--------|-----------------------------|--------------------------------|----------|
| Calcaire algues | 0.0751 | 0.21482 | 36 | Calcite | 87 | 312.93 | 11.558 | 87.43 | 18.7817 | 0.000600 |
| | | | | Dolomite | 6 | 11.71 | 0.754 | 5.70 | 1.2247 | 0.000567 |
| | | | | Anhydrite | 3 | 7.93 | 0.364 | 2.76 | 0.5922 | 0.000548 |
| | | | | Quartz | 4 | 23.97 | 0.544 | 4.11 | 0.8836 | 0.000614 |
| Dolomie Mano | 0.0751 | 0.21482 | 37.7 | Calcite | 6 | 22.58 | 0.834 | 6.31 | 1.3554 | 0.000600 |
| | | | | Dolomite | 87 | 177.73 | 11.435 | 86.50 | 18.5825 | 0.000567 |
| | | | | Anhydrite | 3 | 8.30 | 0.381 | 2.88 | 0.6197 | 0.000548 |
| | | | | Quartz | 4 | 25.08 | 0.569 | 4.30 | 0.9246 | 0.000614 |

Tableau 2 : Proportions minéralogiques initiales du calcaire à algues et de la dolomite de Mano prises pour les simulations 1D. Les surfaces indiquées sont les surfaces réactives.

| | k @ 140°C | Ea(*) | k @ 50°C |
|-----------------|-----------------------|--------|-----------------------|
| | mol/m ² /s | kJ/mol | mol/m ² /s |
| Calcite | 1.00E-05 | 23.5 | 1.49E-06 |
| Dolomite | 4.00E-06 | 95.3 | 1.76E-09 |
| Anhydrite | 1.00E-07 | 14.3 | 3.14E-08 |
| Quartz | 5.00E-07 | 90 | 3.39E-10 |
| Pyrite | 1.00E-04 | 250 | 1.57E-13 |
| Hydroxylapatite | 1.00E-04 | 56.9 | 9.92E-07 |
| Brucite | 1.00E-04 | 42 | 3.32E-06 |
| Chrysotile | 1.00E-04 | 73.5 | 2.58E-07 |
| Ferrosilite(**) | 1.00E-04 | 80 | 1.52E-07 |
| Siderite | 1.00E-04 | 23.5 | 1.49E-05 |
| Talc | 1.00E-04 | 42 | 3.32E-06 |
| Pyrrhotite | 1.00E-04 | 63 | 6.05E-07 |
| Tremolite | 1.00E-04 | 94.4 | 4.74E-08 |

(*) D'après Palandri & Kharaka (2004)

(**) Ea prise comme l'Enstatite (MgSiO₃)

Tableau 3 : Constantes cinétiques à 140°C et 50°C et énergies d'activation. Dans cette étude, la température est fixée à 50°C.

3.2 Résultats

Les modifications minéralogiques relatives et les porosités à 10 et 40 ans d'injection sont représentées :

- En figures 3 et 4 pour le mélange LAP+PILA.
- En figures 5 et 6 pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI.
- En figures 7 et 8 pour l'effluent SOBEGI seul.

Dans ces figures, le changement à 100 m de distance du puits correspond à l'hypothèse de changement de lithologie (calcaire à algues puis dolomie de Mano).

3.2.1 Evolution des minéraux initiaux

Quel que soit le mélange injecté, on retrouve quantitativement les mêmes évolutions minéralogiques pour la calcite, la dolomite, le quartz et l'anhydrite. Le taux de dissolution de ces espèces ne semble donc pas influencé par la composition chimique de l'effluent, ni par son débit.

La vitesse de dissolution/précipitation d'un minéral v (mol/s/m³ de réservoir), dépend de sa constante cinétique k (mol/m²/s), de sa surface réactive SC (S étant la surface réactive spécifique en m²/g et C la concentration du

minéral g/m³ de réservoir) et de l'écart à l'équilibre thermodynamique $\left(1 - \frac{Q}{K}\right)$ où Q représente le produit d'activité des espèces intervenant dans la réaction et K , la constante d'équilibre :

$$v = kSC \left(1 - \frac{Q}{K}\right)$$

Les 4 minéraux initiaux ont des indices de saturation ($SI = \log \frac{Q}{K}$) assez négatifs aussi bien dans les eaux d'entrée que de sortie du système (table 4).

Dans ces conditions, l'expression précédente devient :

$$v = kSC \left(1 - \frac{Q}{K}\right) \equiv kSC \text{ sur toute la longueur du système.}$$

Cette expression indique que la chimie des eaux injectées n'a pas d'impact sur les cinétiques de dissolution. Des écoulements plus lents, ou des cinétiques chimiques plus rapides (surfaces réactives plus grandes ou température plus élevée) sont les seuls paramètres pouvant changer ce régime en rééquilibrant partiellement les eaux avec les minéraux avant leur sortie.

Les surfaces réactives S sont toutes du même ordre de grandeur (table 2). C'est donc finalement le produit kC (constante cinétique x concentration du minéral) qui contrôle les dissolutions respectives. Pour chaque minéral, ce point explique d'autre part :

- l'homogénéité des dissolutions par zone (calcaire à algue, dolomie de Mano)
- le saut observé à l'interface calcaire à algues / dolomie de Mano qui est proportionnel aux contrastes de concentration C de chaque minéral entre les deux zones.

Dans les deux zones, la calcite est l'espèce au plus grand produit kC ; c'est donc elle qui subit les dissolutions les plus importantes.

| | LAP+PILA | | | | LAP+PILA+SOBEGI | | | | SOBEGI | | | |
|-----------|---------------|--------|----------------|-----------|-----------------|--------|----------------|-----------|---------------|--------|----------------|-----------|
| | SI = log(Q/K) | | Dissol (molal) | | SI = log(Q/K) | | Dissol (molal) | | SI = log(Q/K) | | Dissol (molal) | |
| | Entrée | Sortie | Entrée | Sortie | Entrée | Sortie | Entrée | Sortie | Entrée | Sortie | Entrée | Sortie |
| Calcite | -6.5 | -4.2 | -3.51 | -0.25 | -4.8 | -2.7 | -3.51 | -0.25 | -4.5 | -2.5 | -3.51 | -0.25 |
| Dolomite | -13 | -8 | -3.0E-04 | -4.0E-02 | -8.7 | -4.6 | -3.0E-04 | -4.0E-02 | -8 | -4 | -3.0E-04 | -4.0E-02 |
| Anhydrite | -2.4 | -2.3 | -2.33E-03 | -2.44E-03 | -2 | -2 | -2.32E-03 | -2.43E-03 | -1.9 | -1.8 | -2.31E-03 | -2.41E-03 |
| Quartz | -7 | -5 | ε | ε | -7.5 | -5.2 | ε | ε | -7.4 | -5 | ε | ε |

Tableau 4 : Indices de saturation (SI) et dissolutions des minéraux (en molal = mol/kg d'eau porale) en entrée et en sortie du système pour les 3 mélanges étudiés. Valeurs prises à 40 ans d'injection.

3.2.2 Néominéraux et porosité

Les précipitations de néominéraux demeurent marginales en volume. La pyrite est le principal néominéral en raison de sa forte sursaturation dans les eaux injectées (voir annexes 2). Sa précipitation suit globalement un gradient légèrement négatif car la précipitation dans une maille entraîne un indice de saturation plus faible dans la maille suivante.

Les changements volumiques de roche sont donc majoritairement liés aux dissolutions de calcite. La porosité, initialement égale à 7.515% atteint :

- 7.74% dans le calcaire à algues ($\Delta\Phi \sim +0.2\%$) et 7.53% ($\Delta\Phi \sim +0.015\%$) dans la dolomie de Mano après 10 ans d'injection,
- 8.42% ($\Delta\Phi \sim +0.9\%$) et 7.58% ($\Delta\Phi \sim +0.07\%$) dans les mêmes zones après 40 ans d'injection.

Ces changements de porosité restent assez faibles et ne représentent pas de risque pour l'intégrité de la structure.

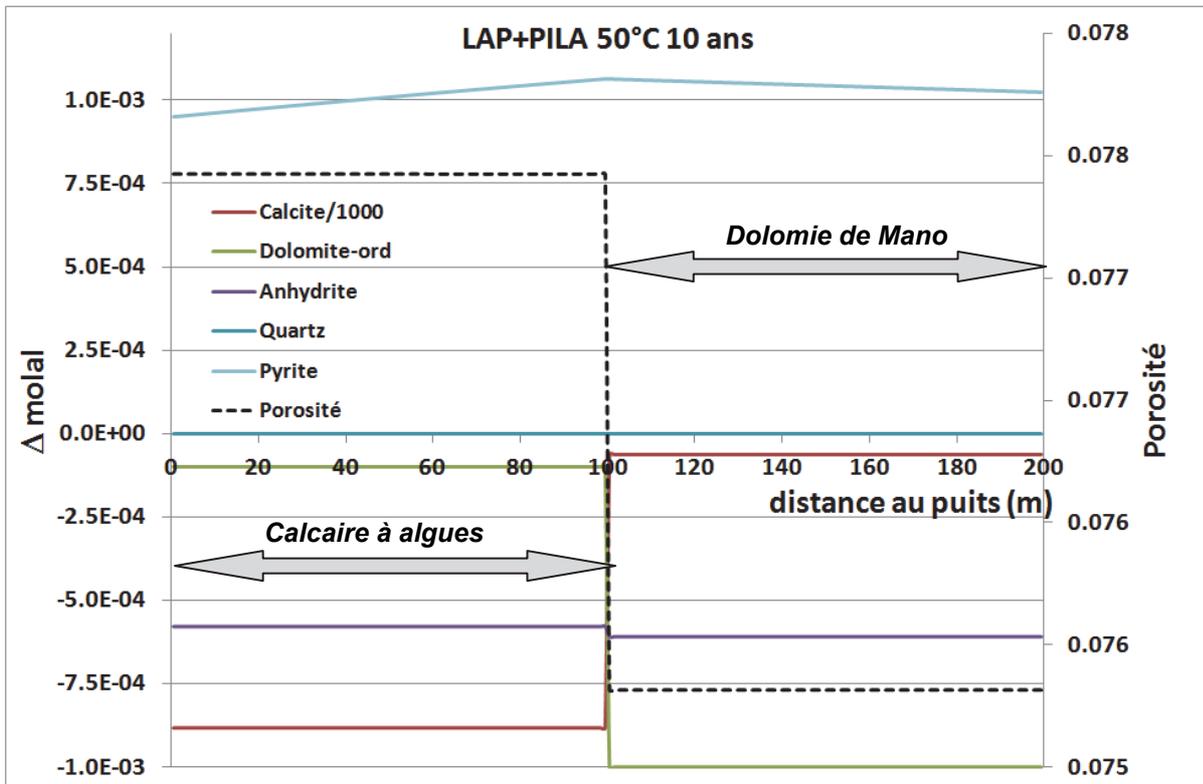


Figure 3 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

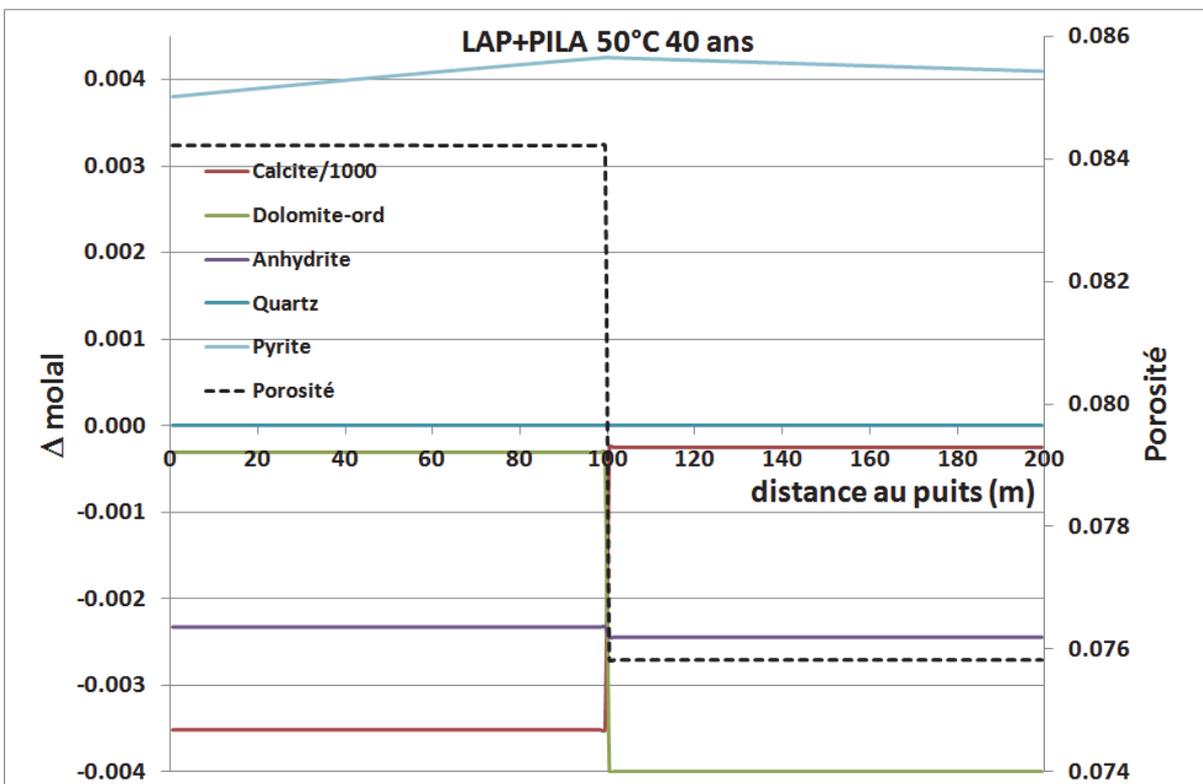


Figure 4 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

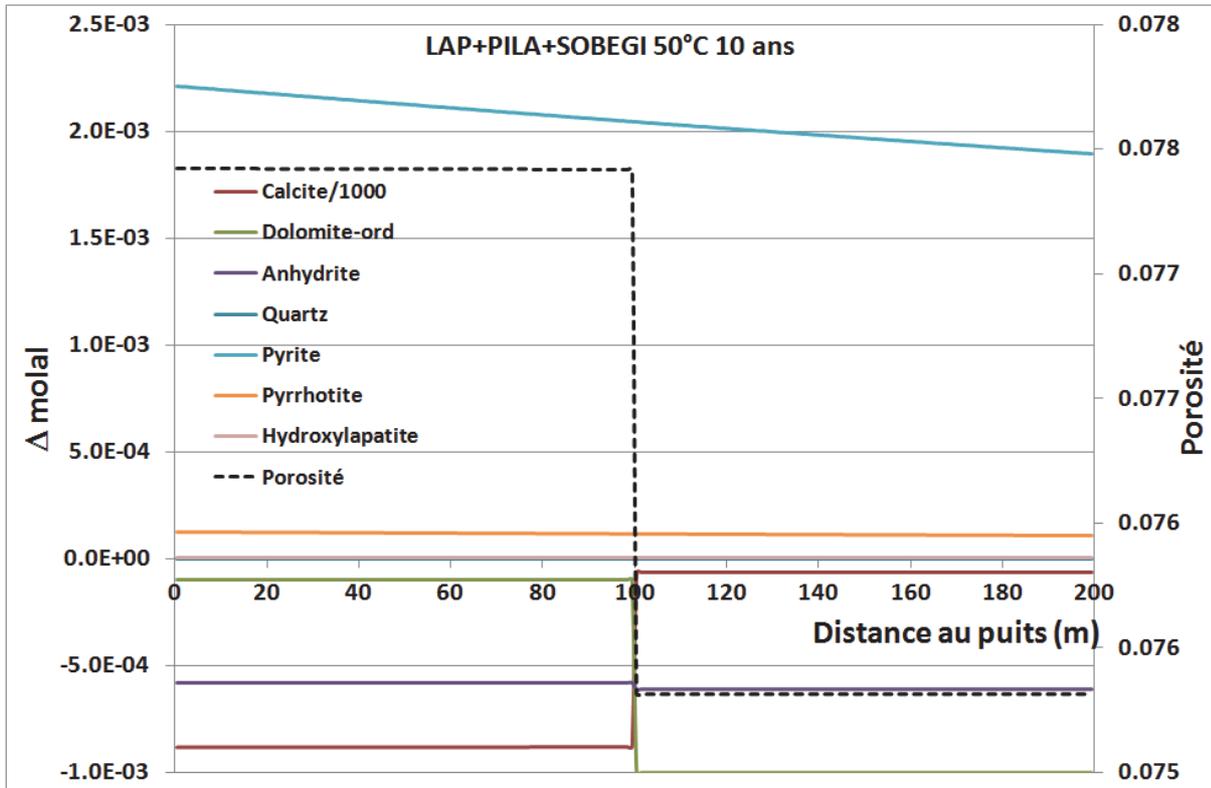


Figure 5 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

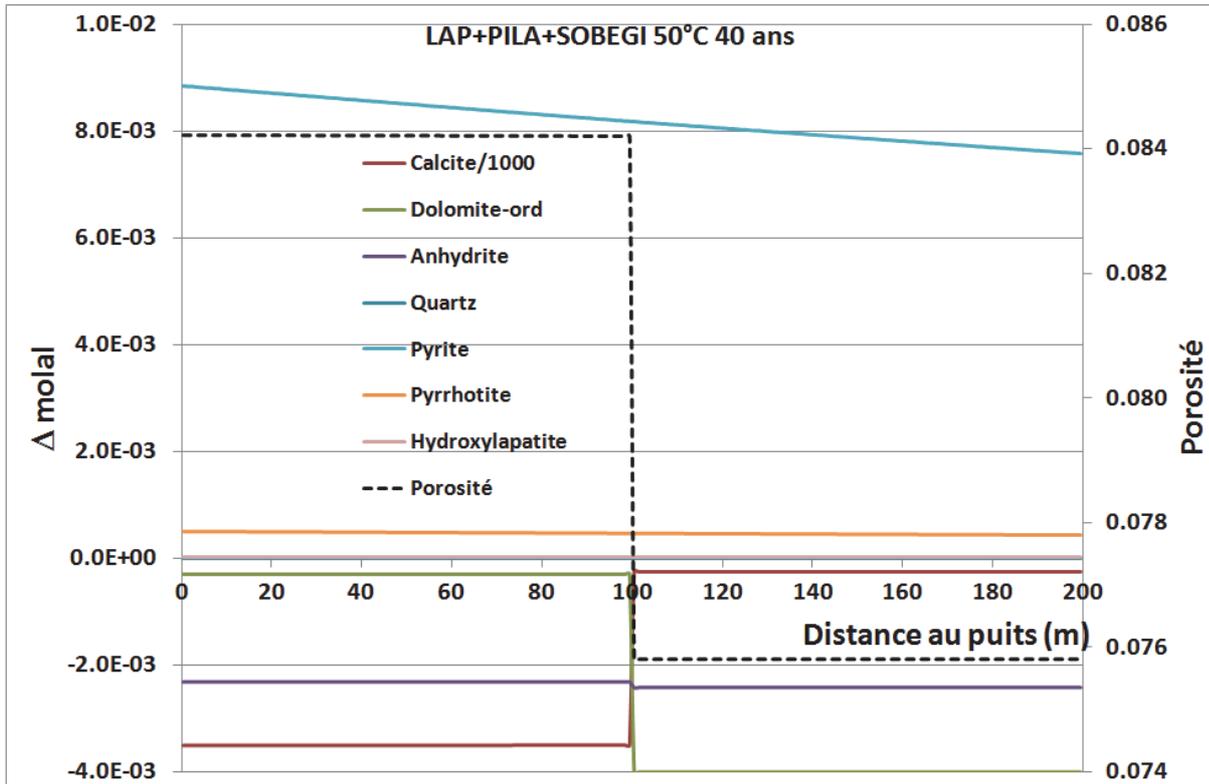


Figure 6 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

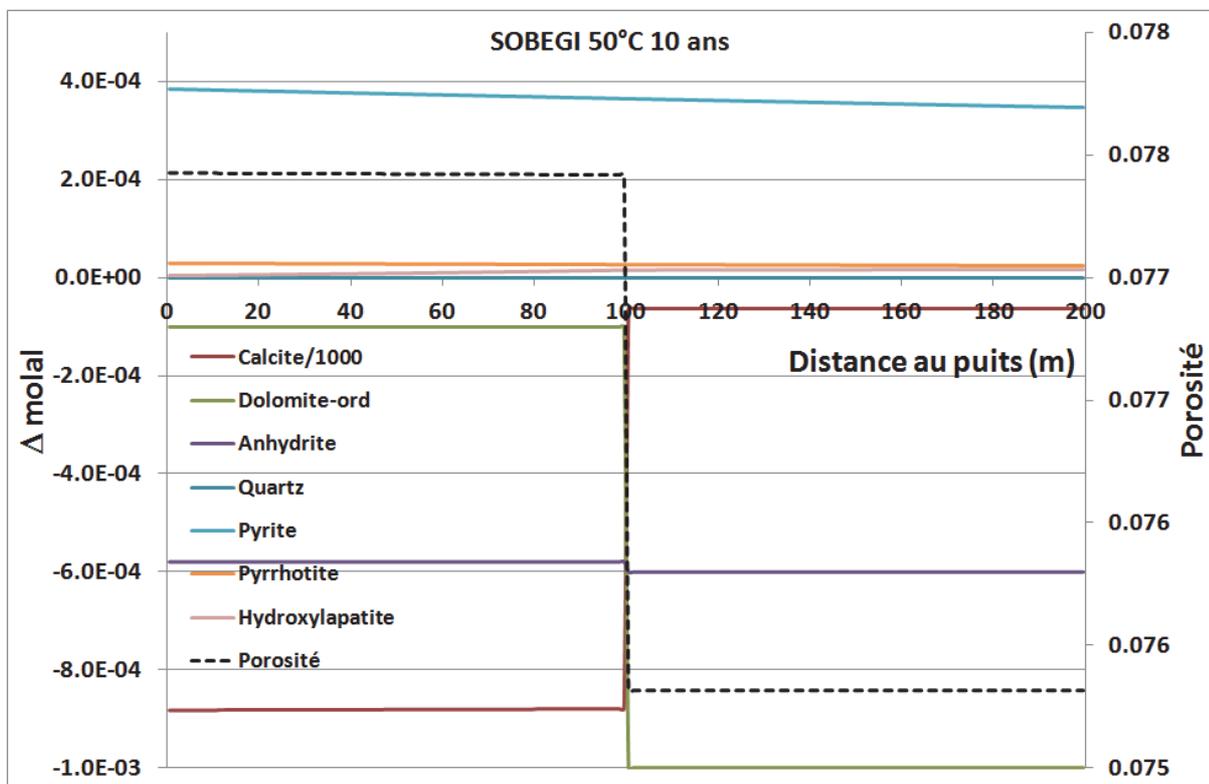


Figure 7 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour l'effluent SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

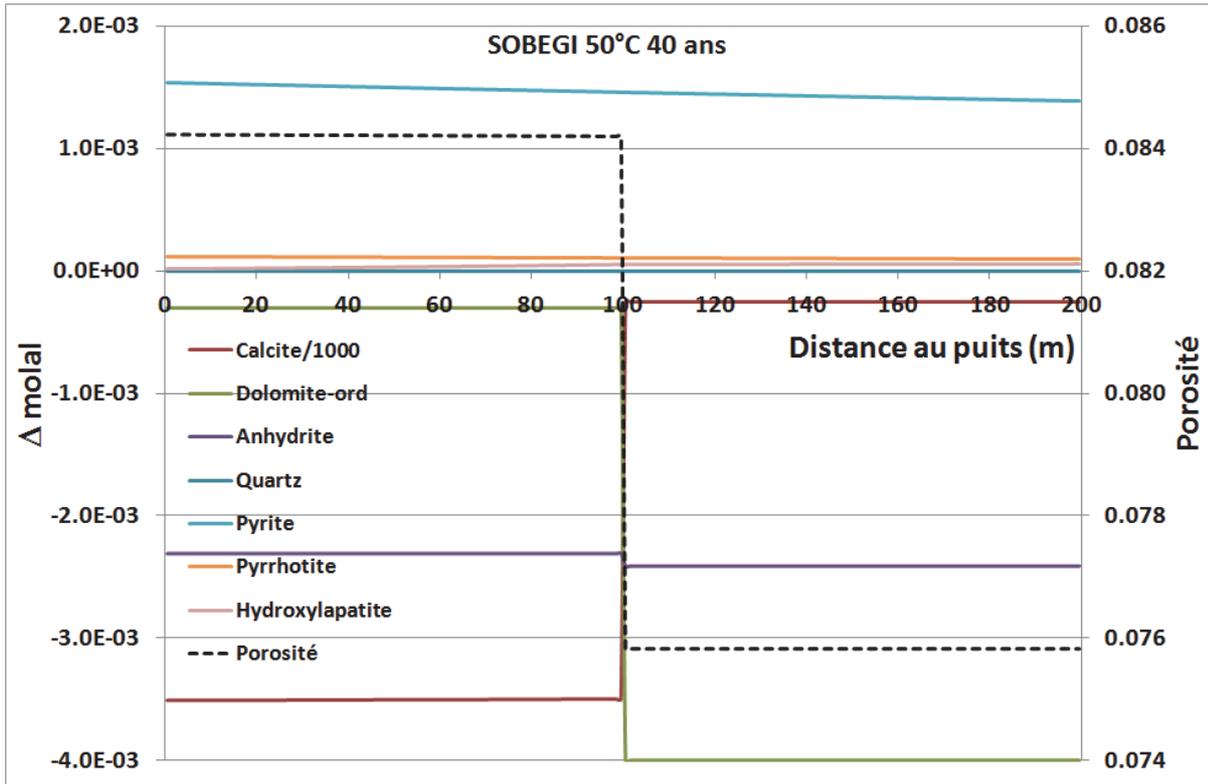


Figure 8 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale) et suivi de la porosité pour l'effluent SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende).

4 Annexes

4.1 Spéciation des eaux aux conditions labo

| Torche BP4.3 20°C | | | | | |
|--------------------|-------------------|------------|-----------|----------|----------|
| | Analyses filtrées | Simulation | Espèce | Molal | Activité |
| pH | 5.9 | 6.5 | H2S(aq) | 0.0152 | 0.0152 |
| Azote totale | mg/l 26.5 | 22.19 | HS[-] | 4.57E-03 | 4.20E-03 |
| Alcalinité | meq/l 3.6 | 4.6 | NH4[+] | 1.62E-03 | 1.49E-03 |
| force ionique | | 5.98E-03 | Ca[2+] | 1.33E-03 | 9.70E-04 |
| elec imb | eq/l | 1.77E-04 | CH3SH(aq) | 7.71E-04 | 7.72E-04 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm 37 | 37 | Na[+] | 3.96E-04 | 3.65E-04 |
| Sulfures (eq. H2S) | ppm 653 | 668.3 | K[+] | 7.59E-05 | 6.98E-05 |
| Ammonium (eq. NH3) | mg/l 27 | 27 | NH3(aq) | 1.89E-06 | 1.89E-06 |
| Sodium | mg/l 8.9 | 8.9 | H[+] | 3.40E-07 | 3.16E-07 |
| Calcium | mg/l 52 | 52 | CH3S[-] | 1.06E-07 | 9.72E-08 |
| Potassium | mg/l 2.9 | 2.9 | OH[-] | 2.36E-08 | 2.17E-08 |
| | | | S[2-] | 1.52E-09 | 9.72E-08 |

Augmentation du pH pour contraindre l'électroneutralité (H2S converti en HS-)

| UTG D40308 20°C | | | | | | |
|---|-------------------|--------|------------|------------|----------|----------|
| | Analyses filtrées | | Simulation | Espèce | molal | activité |
| pH | | 5.9 | 5.9 | H2S(aq) | 0.0257 | 0.0258 |
| Azote totale | mg/l | 28.2 | 35 | NH4[+] | 2.48E-03 | 2.30E-03 |
| Alcalinité | meq/l | 1.7 | 2 | HS[-] | 1.92E-03 | 1.79E-03 |
| force ionique | | | 0.004429 | Na[+] | 1.18E-03 | 1.10E-03 |
| elec imb | eq/l | | -2.80E-06 | CH3SH(aq) | 1.09E-03 | 1.09E-03 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm | 52.5 | 52.5 | S2O3[2-] | 4.29E-04 | 3.22E-04 |
| Sulfures (eq. H2S) | ppm | 915 | 941 | HSO3[-] | 3.06E-04 | 2.85E-04 |
| Chlorures | mg/l | 2.6 | 2.6 | SO4[2-] | 2.26E-04 | 1.70E-04 |
| Sulfates | mg/l | 21.3 | 21.3 | NO3[-] | 7.51E-05 | 6.98E-05 |
| Sulfites | mg/l | 25.5 | 25.5 | Cl[-] | 7.50E-05 | 6.98E-05 |
| Thiosulfates | mg/l | 47 | 47 | Ca[2+] | 2.59E-05 | 1.97E-05 |
| Nitrates | mg/l | 4.55 | 4.55 | SO3[2-] | 1.98E-05 | 1.49E-05 |
| Ammonium (eq. NH3) | mg/l | 41.3 | 41.3 | K[+] | 9.59E-06 | 8.92E-06 |
| Sodium | mg/l | 0.6 | 26.61 | H[+] | 1.34E-06 | 1.26E-06 |
| Calcium | mg/l | 1.03 | 1.03 | NH3(aq) | 7.36E-07 | 7.36E-07 |
| Potassium | mg/l | 0.367 | 0.367 | CaSO4(aq) | 4.17E-07 | 4.18E-07 |
| Phenols | µg/l | 0.1205 | 0.1205 | H2SO3(aq) | 3.86E-08 | 3.87E-08 |
| | | | | CH3S[-] | 3.72E-08 | 3.46E-08 |
| Rq. Na+ augmenté pour atteindre l'électroneutralité | | | | SO2(aq) | 2.33E-08 | 2.33E-08 |
| | | | | HSO4[-] | 1.91E-08 | 1.78E-08 |
| | | | | NaCl(aq) | 1.24E-08 | 1.25E-08 |
| | | | | KSO4[-] | 1.22E-08 | 1.13E-08 |
| | | | | CaNO3[+] | 7.38E-09 | 6.88E-09 |
| | | | | OH[-] | 5.85E-09 | 5.45E-09 |
| | | | | PhenOH(aq) | 1.31E-09 | 1.31E-09 |
| | | | | CaCl[+] | 2.94E-10 | 2.74E-10 |
| | | | | S[2-] | 1.56E-10 | 1.18E-10 |
| | | | | HCl(aq) | 1.90E-11 | 1.90E-11 |
| | | | | KCl(aq) | 1.81E-11 | 1.81E-11 |
| | | | | HNO3(aq) | 3.91E-12 | 3.91E-12 |
| | | | | CaOH[+] | 2.37E-12 | 2.21E-12 |
| | | | | NaOH(aq) | 9.71E-13 | 9.72E-13 |
| | | | | PhenO[-] | 1.26E-13 | 1.17E-13 |

| Arkema Lacq 20°C | | | | | | | | | |
|--|-------|--------|-----------|-----------|----------|----------|------------------|--------------|----------|
| Analyses filtrées Simulation | | | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | |
| pH | | 4.63 | 4.63 | CH3SH(aq) | 0.0466 | 0.0466 | HSO4[-] | 1.58E-06 | 1.44E-06 |
| Azote totale | mg/l | 5.32 | 4.5 | H2S(aq) | 0.0236 | 0.0236 | CaAc[+] | 1.45E-06 | 1.32E-06 |
| Alcalinité | meq/l | 0.55 | 0.6 | Na[+] | 3.94E-03 | 3.60E-03 | CaNO3[+] | 7.01E-07 | 6.40E-07 |
| force ionique | | | 7.82E-03 | HSO3[-] | 1.41E-03 | 1.28E-03 | NaCl(aq) | 6.41E-07 | 6.42E-07 |
| elec imb | eq/l | | -5.41E-08 | Cl[-] | 1.21E-03 | 1.10E-03 | FeSO4(aq) | 5.95E-07 | 5.96E-07 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm | 2234.7 | 2235 | SO4[2-] | 1.07E-03 | 7.38E-04 | MgAc[+] | 3.64E-07 | 3.32E-07 |
| Sulfures (eq. H2S) | ppm | 793 | 807.42 | Ca[2+] | 8.31E-04 | 5.85E-04 | HPO4[2-] | 2.79E-07 | 1.93E-07 |
| Chlorures | mg/l | 42.075 | 42 | AcH(aq) | 3.55E-04 | 3.56E-04 | KSO4[-] | 2.52E-07 | 2.29E-07 |
| Sulfates | mg/l | 106.5 | 106.5 | Ac[-] | 2.91E-04 | 2.66E-04 | H3PO4(aq) | 2.46E-07 | 2.46E-07 |
| Sulfites | mg/l | 114.65 | 0.1109 | NO3[-] | 2.40E-04 | 2.18E-04 | CaCl[+] | 1.41E-07 | 1.29E-07 |
| Thiosulfates | mg/l | 5.8 | 5.8 | HS[-] | 9.68E-05 | 8.82E-05 | CH3S[-] | 8.71E-08 | 7.92E-08 |
| Nitrates | mg/l | 14.58 | 0.01458 | NH4[+] | 8.82E-05 | 8.02E-05 | CaHPO4(aq) | 6.18E-08 | 6.19E-08 |
| Phosphates (eq. HPO43-) | mg/l | 7.68 | 7.76 | Mg[2+] | 8.61E-05 | 6.16E-05 | MgCl[+] | 5.51E-08 | 5.03E-08 |
| Acétates (eq. CH3COOH) | mg/l | 38 | 38 | H2PO4[-] | 8.21E-05 | 7.49E-05 | FeAc[+] | 2.98E-08 | 2.72E-08 |
| Fer | mg/l | 0.43 | 0.43 | CaSO4(aq) | 5.38E-05 | 5.39E-05 | MgHPO4(aq) | 9.63E-09 | 9.65E-09 |
| Ammonium (eq. NH3) | mg/l | 1.45 | 1.468 | S2O3[2-] | 5.29E-05 | 3.66E-05 | NaHPO4[-] | 6.32E-09 | 5.77E-09 |
| Sodium | mg/l | 36.3 | 88.65 | K[+] | 4.58E-05 | 4.17E-05 | HCl(aq) | 5.57E-09 | 5.58E-09 |
| Calcium | mg/l | 34.7 | 34.74 | H[+] | 2.54E-05 | 2.34E-05 | FeCl[+] | 4.19E-09 | 3.82E-09 |
| Magnesium | mg/l | 2.3 | 2.3 | MgSO4(aq) | 1.03E-05 | 1.03E-05 | FeHPO4(aq) | 3.90E-09 | 3.91E-09 |
| Potassium | mg/l | 1.76 | 1.76 | Fe[2+] | 7.24E-06 | 5.10E-06 | NH3(aq) | 1.37E-09 | 1.38E-09 |
| Balance sur Na+ pour électroneutralité | | | | SO3[2-] | 5.21E-06 | 3.61E-06 | KCl(aq) | 1.33E-09 | 1.34E-09 |
| | | | | H2SO3(aq) | 3.24E-06 | 3.25E-06 | OH[-] | 3.21E-10 | 2.93E-10 |
| | | | | SO2(aq) | 1.95E-06 | 1.95E-06 | <i>SI Pyrite</i> | <i>10.66</i> | |

| Arkema Mourenx 20°C | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|----------|-----------|----------|----------|---------------------------|--------------|----------|
| Analyses filtrées Simulation | | | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | |
| pH | | 8.55 | 8.55 | Cl[-] | 4.3536 | 2.7242 | CaCl[+] | 3.39E-05 | 2.42E-05 |
| Azote totale | mg/l | 38000 | 45472 | NH4[+] | 3.1847 | 1.8251 | MgSO4(aq) | 2.43E-05 | 4.84E-05 |
| Alcalinité | meq/l | 178.8 | 170 | Na[+] | 1.3351 | 0.9514 | CaSO4(aq) | 2.17E-05 | 4.33E-05 |
| force ionique | | | 4.60E+00 | NaCl(aq) | 0.2113 | 0.4215 | HSO3[-] | 4.36E-06 | 3.11E-06 |
| elec imb | eq/l | | 4.10E-05 | NH3(aq) | 0.1383 | 0.2759 | OH[-] | 3.86E-06 | 2.59E-06 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm | 170 | 169.8 | SO4[2-] | 6.99E-02 | 7.78E-03 | S[2-] | 2.29E-06 | 3.67E-07 |
| Sulfures (eq. H2S) | ppm | 588 | 588 | HS[-] | 1.76E-02 | 1.18E-02 | H2PO4[-] | 1.87E-06 | 1.33E-06 |
| Chlorures | mg/l | 92658 | 158200 | S2O3[2-] | 3.73E-03 | 4.15E-04 | PO4[3-] | 8.84E-07 | 4.46E-09 |
| Sulfates | mg/l | 6568 | 6568 | CH3SH(aq) | 3.39E-03 | 6.76E-03 | CaPO4[-] | 8.71E-07 | 6.21E-07 |
| Sulfites | mg/l | 42 | 42 | SO3[2-] | 5.32E-04 | 7.22E-05 | MgPO4[-] | 7.14E-07 | 5.09E-07 |
| Thiosulfates | mg/l | 409 | 409 | NaHPO4[-] | 3.19E-04 | 2.27E-04 | CaHPO4(aq) | 3.51E-07 | 7.00E-07 |
| Phosphates (eq. HPO43-) | mg/l | 54 | 54.57 | HPO4[2-] | 2.58E-04 | 2.87E-05 | MgHPO4(aq) | 3.16E-07 | 6.30E-07 |
| Ammonium (eq. NH3) | mg/l | 55320 | 55320 | Ca[2+] | 2.10E-04 | 4.44E-05 | NaOH(aq) | 1.99E-07 | 3.98E-07 |
| Sodium | mg/l | 34757 | 34760 | H2S(aq) | 1.86E-04 | 3.71E-04 | Na2P2O7[2-] | 1.86E-08 | 2.07E-09 |
| Calcium | mg/l | 12 | 12 | CH3S[-] | 1.53E-04 | 9.55E-05 | NaP2O7[3-] | 5.44E-09 | 2.74E-11 |
| Magnesium | mg/l | 4.5 | 4.5 | Mg[2+] | 8.79E-05 | 2.70E-05 | CaOH[+] | 3.12E-09 | 2.22E-09 |
| Balance sur Cl- pour électroneutralité | | | | MgCl[+] | 7.62E-05 | 5.43E-05 | H[+] | 2.97E-09 | 2.82E-09 |
| | | | | CaCl2(aq) | 3.90E-05 | 7.78E-05 | <i>SI Hydroxylapatite</i> | <i>1.409</i> | |

| SPEICHIM 20°C | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---------|------------|------------|----------|----------|--------------------|----------|----------|
| | Analyses filtrées | | Simulation | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| pH | | 7.68 | 7.68 | Na[+] | 0.1986 | 0.1447 | CaSO4(aq) | 2.35E-06 | 2.47E-06 |
| Azote totale | mg/l | 368.5 | 174.45 | Ac[-] | 0.1702 | 0.1259 | CH3S[-] | 1.66E-06 | 1.16E-06 |
| Alcalinité | meq/l | 124.4 | 120 | Cl[-] | 0.0376 | 0.0264 | CaCl[+] | 7.59E-07 | 5.53E-07 |
| force ionique | | | 2.15E-01 | NH4[+] | 1.25E-02 | 8.62E-03 | KSO4[-] | 6.66E-07 | 4.85E-07 |
| elec imb | eq/l | | -1.15E-04 | SO3[2-] | 1.02E-03 | 2.87E-04 | CaOx | 5.90E-07 | 6.19E-07 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm | 28 | 28 | SO4[2-] | 7.10E-04 | 1.88E-04 | MgSO4(aq) | 4.92E-07 | 5.17E-07 |
| Sulfures (eq. H2S) | ppm | 2 | 2 | NaCl(aq) | 5.89E-04 | 6.18E-04 | NaBr(aq) | 4.63E-07 | 4.87E-07 |
| Chlorures | mg/l | 1322 | 1322 | CH3SH(aq) | 5.82E-04 | 6.11E-04 | OH[-] | 4.58E-07 | 3.28E-07 |
| Sulfates | mg/l | 67 | 67 | K[+] | 4.91E-04 | 3.45E-04 | CaPO4[-] | 4.52E-07 | 3.29E-07 |
| Sulfites | mg/l | 89.5 | 89.5 | Ca[2+] | 3.19E-04 | 1.05E-04 | MgHPO4(aq) | 4.49E-07 | 4.72E-07 |
| Thiosulfates | mg/l | 30 | 30 | S2O3[2-] | 2.74E-04 | 7.26E-05 | MgCl[+] | 3.26E-07 | 2.38E-07 |
| Nitrates | mg/l | 5 | 5 | HPO4[2-] | 1.80E-04 | 4.78E-05 | KCl(aq) | 2.52E-07 | 2.65E-07 |
| Phosphates (eq. HPO43-) | mg/l | 26.5 | 26.78 | NH3(aq) | 1.58E-04 | 1.66E-04 | MgOx | 1.88E-07 | 1.97E-07 |
| Bromure | mg/l | 9 | 9 | CaAc[+] | 1.54E-04 | 1.12E-04 | KHPO4[-] | 1.36E-07 | 9.93E-08 |
| Oxalates (eq. C2O42-) | mg/l | 2.5 | 2.5 | AcH(aq) | 1.43E-04 | 1.50E-04 | MgPO4[-] | 7.06E-08 | 5.14E-08 |
| Acétates (eq. CH3COOH) | mg/l | 4652.25 | 10000 | HSO3[-] | 1.25E-04 | 9.09E-05 | CaNO3[+] | 4.18E-08 | 3.05E-08 |
| Ammonium (eq. NH3) | mg/l | 210.8 | 210.8 | Br[-] | 1.15E-04 | 8.07E-05 | H[+] | 2.57E-08 | 2.09E-08 |
| Sodium | mg/l | 5227.57 | 4478 | NO3[-] | 8.25E-05 | 5.80E-05 | PO4[3-] | 2.00E-08 | 9.83E-10 |
| Calcium | mg/l | 18.8 | 18.8 | NaHPO4[-] | 7.89E-05 | 5.75E-05 | CaCl2(aq) | 1.66E-08 | 1.74E-08 |
| Magnesium | mg/l | 1.8 | 1.8 | HS[-] | 5.20E-05 | 3.73E-05 | NaOH(aq) | 7.31E-09 | 7.68E-09 |
| Potassium | mg/l | 18.84 | 18.8 | MgAc[+] | 4.26E-05 | 3.10E-05 | HOx[-] | 3.80E-09 | 2.67E-09 |
| Concentration en acétates ajustées pour retrouver une bonne alcalini | | | | Mg[2+] | 3.17E-05 | 1.22E-05 | CaP2O7[2-] | 1.02E-09 | 2.71E-10 |
| Concentration en Na+ ajustée pour électroneutralité | | | | Ox[2-] | 2.83E-05 | 6.52E-06 | CaOH[+] | 9.73E-10 | 7.09E-10 |
| | | | | H2PO4[-] | 2.27E-05 | 1.66E-05 | Na2P2O7[2-] | 5.00E-10 | 1.33E-10 |
| | | | | H2S(aq) | 8.47E-06 | 8.90E-06 | S[2-] | 4.96E-10 | 1.48E-10 |
| | | | | CaHPO4(aq) | 2.62E-06 | 2.75E-06 | SI Hydroxylapatite | 0.3703 | |

| SBS | | | | | | |
|--|---------|-------|------------|-----------|----------|----------|
| | Analyse | | Simulation | Espèce | Molal | Activité |
| pH | | 7.3 | 6.4 | Na[+] | 1.2297 | 0.8205 |
| Azote totale | mg/l | 6.5 | / | HSO3[-] | 0.3239 | 0.2161 |
| Alcalinité | meq/l | 224.4 | 250 | SO3[2-] | 0.2445 | 0.0358 |
| force ionique | | | 1.66E+00 | SO4[2-] | 0.1883 | 0.0234 |
| elec imb | eq/l | | 8.05E-04 | Cl[-] | 4.00E-02 | 2.40E-02 |
| RSH (eq. CH3SH) | ppm | 110 | 110 | CH3SH(aq) | 2.29E-03 | 3.36E-03 |
| Chlorures | mg/l | 1461 | 1461 | NaCl(aq) | 2.18E-03 | 3.19E-03 |
| Sulfates | mg/l | 17707 | 17710 | Ca[2+] | 4.94E-04 | 1.05E-04 |
| Sulfites | mg/l | 44480 | 44480 | S2O3[2-] | 3.10E-04 | 3.86E-05 |
| Thiosulfates | mg/l | 34 | 34 | CaSO4(aq) | 2.10E-04 | 3.08E-04 |
| Fer | mg/l | 1.4 | 1.4 | K[+] | 1.74E-04 | 1.05E-04 |
| Sodium | mg/l | 36830 | 27680 | KSO4[-] | 2.74E-05 | 1.83E-05 |
| Calcium | mg/l | 27.6 | 27.6 | Fe[2+] | 1.66E-05 | 3.53E-06 |
| Potassium | mg/l | 7.7 | 7.7 | FeSO4(aq) | 8.95E-06 | 1.31E-05 |
| Baisse du pH pour réduire l'alcalinité (effet sur SO32-/HSO3-) | | | | H2SO3(aq) | 6.32E-06 | 9.28E-06 |
| Concentration en Na+ ajustée pour électroneutralité | | | | SO2(aq) | 3.81E-06 | 5.58E-06 |
| | | | | HSO4[-] | 1.16E-06 | 7.77E-07 |
| | | | | CaCl[+] | 7.56E-07 | 5.04E-07 |
| | | | | CH3S[-] | 5.59E-07 | 3.36E-07 |
| | | | | H[+] | 4.66E-07 | 3.98E-07 |
| | | | | FeCl[+] | 8.65E-08 | 5.77E-08 |
| | | | | KCl(aq) | 4.98E-08 | 7.31E-08 |
| | | | | OH[-] | 2.71E-08 | 1.72E-08 |

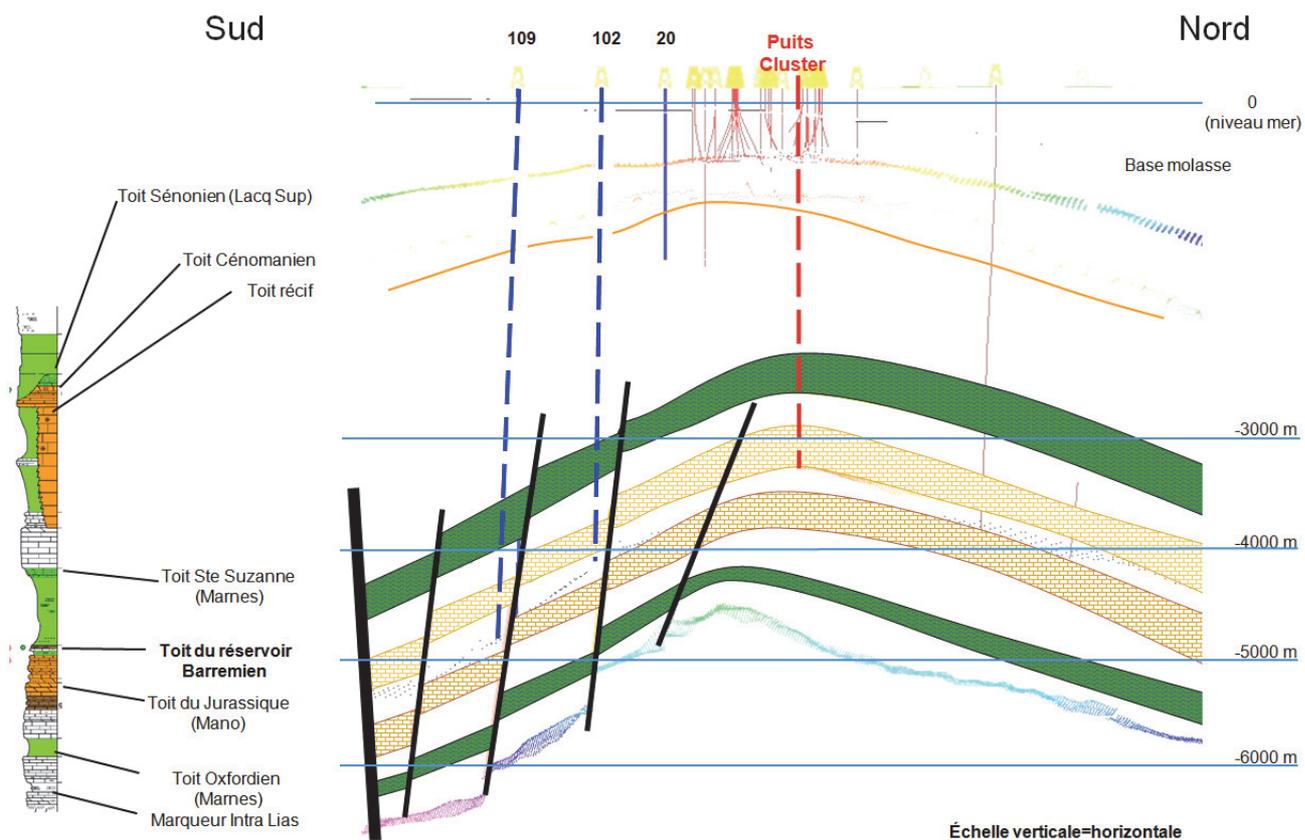
4.2 Spéciation des mélanges aux conditions fond (50°C)

| LAP+PILA 50°C | | | | | | SOBEGI 50°C | | | | | | LAP+PILA+SOBEGI 50°C | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|---------------------------|----------|----------|
| Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité | Espèce | Molal | Activité |
| H2S(aq) | 0.025 | 0.025 | CH3S[-] | 2.15E-07 | 1.97E-07 | Cl[-] | 3.966 | 2.446 | MgHPO4(aq) | 2.37E-07 | 4.73E-07 | Cl[-] | 2.476 | 1.502 | MgHPO4(aq) | 1.70E-07 | 3.13E-07 |
| CH3SH(aq) | 0.017 | 0.017 | NaCl(aq) | 1.85E-07 | 1.85E-07 | NH4[+] | 2.924 | 1.644 | PO4[3-] | 2.29E-07 | 9.23E-10 | NH4[+] | 1.804 | 1.002 | FeCl4[2-] | 1.56E-07 | 1.61E-08 |
| Na[+] | 2.27E-03 | 2.09E-03 | CaNO3[+] | 1.61E-07 | 1.48E-07 | Na[+] | 1.238 | 0.875 | Fe[2+] | 1.93E-07 | 3.82E-08 | Na[+] | 0.803 | 0.555 | PO4[3-] | 1.34E-07 | 5.81E-10 |
| NH4[+] | 1.62E-03 | 1.48E-03 | H2SO3(aq) | 1.54E-07 | 1.55E-07 | NaCl(aq) | 0.219 | 0.436 | NaOH(aq) | 1.91E-07 | 3.82E-07 | NaCl(aq) | 0.092 | 0.170 | NaOH(aq) | 1.07E-07 | 1.98E-07 |
| HS[-] | 1.48E-03 | 1.36E-03 | FeSO4(aq) | 1.13E-07 | 1.13E-07 | NH3(aq) | 0.121 | 0.241 | CaPO4[-] | 1.19E-07 | 8.41E-08 | NH3(aq) | 0.065 | 0.120 | CaPO4[-] | 9.01E-08 | 6.23E-08 |
| H2SO3[-] | 7.11E-04 | 6.53E-04 | KSO4[-] | 7.80E-08 | 7.17E-08 | SO4[2-] | 6.84E-02 | 6.96E-03 | NaBr(aq) | 1.11E-07 | 2.21E-07 | SO4[2-] | 4.22E-02 | 4.35E-03 | FeSO4(aq) | 6.37E-08 | 1.18E-07 |
| SO4[2-] | 5.24E-04 | 3.72E-04 | MgAc[+] | 6.96E-08 | 6.39E-08 | HS[-] | 1.57E-02 | 1.05E-02 | FeCl[+] | 1.09E-07 | 7.73E-08 | HS[-] | 1.93E-02 | 1.25E-02 | NaBr(aq) | 4.61E-08 | 8.51E-08 |
| Cl[-] | 4.75E-04 | 4.35E-04 | CaHPO4(aq) | 6.63E-08 | 6.64E-08 | SO3[2-] | 1.25E-02 | 1.57E-03 | MgPO4[-] | 7.69E-08 | 5.44E-08 | CH3SH(aq) | 8.62E-03 | 1.59E-02 | MgPO4[-] | 4.25E-08 | 2.94E-08 |
| Ca[2+] | 3.38E-04 | 2.44E-04 | CaCl[+] | 2.70E-08 | 2.48E-08 | Ac[-] | 1.04E-02 | 7.74E-03 | H2SO4[-] | 3.90E-08 | 2.75E-08 | SO3[2-] | 7.79E-03 | 9.82E-04 | H2SO4[-] | 3.05E-08 | 2.11E-08 |
| S2O3[2-] | 2.88E-04 | 2.05E-04 | H3PO4(aq) | 1.80E-08 | 1.80E-08 | S2O3[2-] | 3.44E-03 | 3.51E-04 | FeSO4(aq) | 2.11E-08 | 4.22E-08 | Ac[-] | 6.47E-03 | 4.70E-03 | H[+] | 2.62E-08 | 2.42E-08 |
| Ac[-] | 1.91E-04 | 1.76E-04 | OH[-] | 1.69E-08 | 1.55E-08 | CH3SH(aq) | 3.31E-03 | 6.61E-03 | H[+] | 2.07E-08 | 1.98E-08 | S2O3[2-] | 2.22E-03 | 2.30E-04 | FeAc[+] | 2.29E-08 | 1.58E-08 |
| NO3[-] | 1.32E-04 | 1.21E-04 | NaHPO4[-] | 9.37E-09 | 8.61E-09 | H2SO3[-] | 1.05E-03 | 7.43E-04 | Na2P2O7[2-] | 1.49E-08 | 1.52E-09 | H2S(aq) | 8.67E-04 | 1.60E-03 | CaNO3[+] | 1.27E-08 | 8.77E-09 |
| AcH(aq) | 3.71E-05 | 3.72E-05 | MgHPO4(aq) | 8.79E-09 | 8.80E-09 | H2S(aq) | 5.46E-04 | 1.09E-03 | FeAc[+] | 8.27E-09 | 5.85E-09 | H2SO3[-] | 8.23E-04 | 5.69E-04 | FePO4[-] | 8.51E-09 | 5.88E-09 |
| Mg[2+] | 2.99E-05 | 2.19E-05 | MgCl[+] | 8.35E-09 | 7.67E-09 | NaHPO4[-] | 2.75E-04 | 1.95E-04 | P2O7[4-] | 7.66E-09 | 3.36E-13 | Ca[2+] | 2.70E-04 | 5.33E-05 | FeHPO4(aq) | 7.58E-09 | 1.40E-08 |
| H2PO4[-] | 2.84E-05 | 2.61E-05 | FeAc[+] | 7.23E-09 | 6.64E-09 | HPO4[2-] | 2.63E-04 | 2.67E-05 | NaP2O7[3-] | 5.42E-09 | 2.19E-11 | HPO4[2-] | 2.00E-04 | 2.06E-05 | HCl(aq) | 4.04E-09 | 7.45E-09 |
| K[+] | 2.36E-05 | 2.16E-05 | FeHPO4(aq) | 3.77E-09 | 3.78E-09 | Ca[2+] | 2.28E-04 | 4.53E-05 | MgOx | 5.10E-09 | 1.02E-08 | NaHPO4[-] | 1.38E-04 | 9.51E-05 | P2O7[4-] | 3.89E-09 | 2.00E-13 |
| CaSO4(aq) | 1.48E-05 | 1.48E-05 | PhenOH(aq) | 8.25E-10 | 8.26E-10 | Mg[2+] | 7.39E-05 | 2.18E-05 | HCl(aq) | 4.97E-09 | 9.91E-09 | Mg[2+] | 6.46E-05 | 1.87E-05 | Na2P2O7[2-] | 3.52E-09 | 3.63E-10 |
| SO3[2-] | 1.10E-05 | 7.87E-06 | FeCl[+] | 7.50E-10 | 6.89E-10 | MgCl[+] | 6.07E-05 | 4.29E-05 | KHPO4[-] | 4.46E-09 | 3.15E-09 | NO3[-] | 5.41E-05 | 3.28E-05 | FeOH[+] | 3.22E-09 | 2.23E-09 |
| MgSO4(aq) | 4.19E-06 | 4.20E-06 | KCl(aq) | 4.78E-10 | 4.79E-10 | MgSO4(aq) | 3.92E-05 | 7.83E-05 | CaOx | 3.86E-09 | 7.69E-09 | CH3S[-] | 4.31E-05 | 2.61E-05 | KHPO4[-] | 3.13E-09 | 2.16E-09 |
| H[+] | 3.74E-06 | 3.47E-06 | HCl(aq) | 3.09E-10 | 3.09E-10 | CaCl[+] | 3.67E-05 | 2.59E-05 | FePO4[-] | 2.97E-09 | 2.10E-09 | MgCl[+] | 3.27E-05 | 2.26E-05 | CaOx | 3.12E-09 | 5.75E-09 |
| Fe[2+] | 2.66E-06 | 1.92E-06 | S[2-] | 3.02E-10 | 2.16E-10 | K[+] | 3.17E-05 | 1.96E-05 | HP2O7[3-] | 2.61E-09 | 1.05E-11 | K[+] | 2.87E-05 | 1.74E-05 | MgOx | 3.01E-09 | 5.56E-09 |
| NH3(aq) | 1.24E-06 | 1.24E-06 | FeOH[+] | 1.90E-10 | 1.75E-10 | CaCl2(aq) | 2.99E-05 | 5.97E-05 | FeHPO4(aq) | 2.04E-09 | 4.07E-09 | CaCl[+] | 2.71E-05 | 1.87E-05 | NaP2O7[3-] | 1.90E-09 | 8.24E-12 |
| HPO4[2-] | 6.97E-07 | 4.95E-07 | <i>pH</i> | | 5.46 | CaSO4(aq) | 2.58E-05 | 5.16E-05 | MgP2O7[2-] | 1.59E-09 | 1.62E-10 | MgSO4(aq) | 2.28E-05 | 4.21E-05 | HP2O7[3-] | 1.77E-09 | 7.67E-12 |
| CaAc[+] | 4.69E-07 | 4.31E-07 | <i>Force ionique</i> | | 0.005858 | CH3S[-] | 2.16E-05 | 1.33E-05 | CaNO3[+] | 9.98E-10 | 7.05E-10 | CaSO4(aq) | 2.06E-05 | 3.79E-05 | FeCl2(aq) | 1.04E-09 | 1.92E-09 |
| SO2(aq) | 3.06E-07 | 3.06E-07 | <i>SI Pyrite</i> | | 10.27 | H2PO4[-] | 1.14E-05 | 8.03E-06 | SO2(aq) | 9.96E-10 | 1.99E-09 | CaCl2(aq) | 1.44E-05 | 2.65E-05 | SO2(aq) | 1.01E-09 | 1.87E-09 |
| HSO4[-] | 2.81E-07 | 2.58E-07 | <i>SI Troilite</i> | | 0.8213 | Br[-] | 6.93E-06 | 4.27E-06 | FeOH[+] | 8.65E-10 | 6.11E-10 | H2PO4[+] | 1.10E-05 | 7.58E-06 | MgP2O7[2-] | 7.99E-10 | 8.25E-11 |
| | | | | | | NO3[-] | 5.04E-06 | 3.11E-06 | NaHP2O7[2-] | 8.60E-10 | 8.76E-11 | Br[-] | 4.27E-06 | 2.59E-06 | H2SO3(aq) | 5.11E-10 | 9.42E-10 |
| | | | | | | CaAc[+] | 5.00E-06 | 3.53E-06 | FeCl2(aq) | 5.71E-10 | 1.14E-09 | AcH(aq) | 3.77E-06 | 6.96E-06 | CaOH[+] | 4.49E-10 | 3.11E-10 |
| | | | | | | AcH(aq) | 4.69E-06 | 9.35E-06 | H2SO3(aq) | 5.03E-10 | 1.00E-09 | CaAc[+] | 3.65E-06 | 2.52E-06 | NaHP2O7[2-] | 3.91E-10 | 4.04E-11 |
| | | | | | | OH[-] | 4.08E-06 | 2.71E-06 | CaOH[+] | 4.58E-10 | 3.23E-10 | OH[-] | 3.40E-06 | 2.21E-06 | PhenOH(aq) | 3.14E-10 | 5.80E-10 |
| | | | | | | MgAc[+] | 3.97E-06 | 2.81E-06 | NH4SO4[-] | 4.09E-10 | 2.89E-10 | MgAc[+] | 2.12E-06 | 1.46E-06 | CaP2O7[2-] | 2.48E-10 | 2.56E-11 |
| | | | | | | S[2-] | 1.95E-06 | 2.92E-07 | <i>pH</i> | | 7.704 | S[2-] | 1.91E-06 | 2.86E-07 | NH4SO4[-] | 1.59E-10 | 1.10E-10 |
| | | | | | | Ox[2-] | 1.77E-06 | 1.04E-07 | <i>Force ionique</i> | | 4.248 | Ox[2-] | 1.08E-06 | 6.62E-08 | <i>pH</i> | | 7.616 |
| | | | | | | KSO4[-] | 1.72E-06 | 1.21E-06 | <i>SI Pyrite</i> | | 9.882 | KSO4[-] | 9.77E-07 | 6.76E-07 | <i>Force ionique</i> | | 2.66 |
| | | | | | | KCl(aq) | 1.22E-06 | 2.43E-06 | <i>SI Troilite</i> | | 2.252 | Fe[2+] | 8.65E-07 | 1.71E-07 | <i>SI Pyrite</i> | | 10.64 |
| | | | | | | CaHPO4(aq) | 3.34E-07 | 6.66E-07 | <i>SI Pyrrhotite</i> | | 2.16 | KCl(aq) | 7.21E-07 | 1.33E-06 | <i>SI Troilite</i> | | 2.892 |
| | | | | | | FeCl4[2-] | 2.49E-07 | 2.54E-08 | <i>SI Hydroxylapatite</i> | | 1.239 | CaHPO4(aq) | 3.27E-07 | 6.04E-07 | <i>SI Pyrrhotite</i> | | 2.801 |
| | | | | | | | | | | | | FeCl[+] | 3.06E-07 | 2.12E-07 | <i>SI Hydroxylapatite</i> | | 0.9017 |

4.3 Coupe géologique situant les puits LA102 et LA109.

TOTAL E&P FRANCE

Coupe passant par les injecteurs 109, 102 et 20



Liste des références

P. Chiquet (2011) France Lacq profond. Injection d'eaux industrielles dans le C4000. Modélisations complémentaires au dossier de demande d'autorisation de 2006. Intégration du transport et évaluations des effets thermiques. *Rapport DGEP/EXPLO/TE/ISS/RGM R2011-051*.

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Interprétation géométrique du système 1D. Vue d'ensemble..... | 6 |
| Figure 2 : Interprétation géométrique du système 1D. Section représentant l'alternance fractures/bandes de roche. Ce système n'est pas explicitement modélisé, mais il représente correctement la porosité et la surface géométrique totale. La surface réactive est ensuite fixée à 1% de la surface géométrique..... | 7 |
| Figure 3 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 10 |
| Figure 4 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 11 |
| Figure 5 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 11 |
| Figure 6 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour le mélange LAP+PILA+SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 12 |
| Figure 7 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour l'effluent SOBEGI à 10 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 12 |
| Figure 8 : Modifications minéralogiques (var. en mol/kg d'eau porale initiale) et suivi de la porosité pour l'effluent SOBEGI à 40 ans d'injection. Les variations de calcite ne sont pas à la même échelle que les autres espèces (voir légende)..... | 13 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|---|
| Tableau 1 : Schéma des injections. Présentation des deux scénarios..... | 3 |
| Tableau 2 : Proportions minéralogiques initiales du calcaire à algues et de la dolomite de Mano prises pour les simulations 1D. Les surfaces indiquées sont les surfaces réactives..... | 7 |
| Tableau 3 : Constantes cinétiques à 140°C et 50°C et énergies d'activation. Dans cette étude, la température est fixée à 50°C..... | 8 |
| Tableau 4 : Indices de saturation et dissolutions des minéraux en entrée et en sortie du système pour les 3 mélanges étudiés. Valeurs prises à 40 ans d'injection..... | 9 |

Liste des fichiers numériques utilisés dans l'étude

Liste des fichiers natifs du rapport

| Nom fichier | Format/Type du fichier | Logiciel version | Média | Auteur/Entité | Date |
|-------------|------------------------|------------------|-------|---------------|------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Liste des bases de données et applicatifs utilisés dans l'étude

| Nom fichier | Format/Type du fichier | Logiciel version | Média | Auteur/Entité | Date |
|---------------------|------------------------|------------------|-------|---------------|------|
| Arkema_Lacq_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| Arkema_Mour_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SPEICHIM_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| UTG_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| TORCHE_BP43_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SBS_20C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| Arkema_Lacq_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| Arkema_Mour_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SPEICHIM_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| UTG_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| TORCHE_BP43_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SBS_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| LAP_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |

| | | | | | |
|-------------------------|------|-----------|--|--|--|
| LAP+PILA_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SBS+SPEICHIM_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| SOBEGI_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| LAP+PILA+SOBEGI_50C.chs | .txt | CHESS 3.6 | | | |
| LAP+PILA.htc | .txt | HYTEC 3.6 | | | |
| LAP+PILA+SOBEGI.htc | | HYTEC 3.6 | | | |
| SOBEGI.htc | | HYTEC 3.6 | | | |