



**HAL**  
open science

# Etude de la carbonatation des dispositifs du drainage profond de l'infrastructure ferroviaire

Neng Jia

► **To cite this version:**

Neng Jia. Etude de la carbonatation des dispositifs du drainage profond de l'infrastructure ferroviaire. Génie civil. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1153 . tel-02304550

**HAL Id: tel-02304550**

**<https://pastel.hal.science/tel-02304550>**

Submitted on 3 Oct 2019

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

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

# UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

*Sciences, Ingénierie et Environnement (SIE)*

## THESE

Etude de la carbonatation des dispositifs de drainage profond  
de l'infrastructure ferroviaire

*Discipline : Les sciences de l'environnement*

JIA Neng

Thèse dirigée par ...Bruno TASSIN.....

Soutenue le ...17/12/2018.....

Jury :

Eric GAUME, IFSTTAR Nantes, Rapporteur  
Olivier FOUCHE, CNAM, Rapporteur  
Régis MOILLERON, UPEC, Examineur  
Mathilde KOSCIELNY, Expert SNCF Réseau, Examinatrice  
Bruno TASSIN, ENPC, Directeur de la thèse  
François PREVOT, MCF, Université de Paris, Co-encadrant

Invités :

Dimitri DENELEE, IMN  
Nicolas CALON, Expert SNCF







# Remerciements

Un grand merci à vous tous qui m'avez accompagnée tout au long de cette thèse.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Bruno Tassin, pour m'avoir appris à être moins « bonne élève » et plus autonome tout au long de ce travail de recherche. Sa relecture finale méticuleuse de chacun des chapitres de mon mémoire m'a sans aucun doute permis de préciser mon propos.

Je remercie également tous mes co-encadrants : François Prévot et Mathilde Koscielny pour leurs partages de connaissances et expériences tout le long du déroulement de cette thèse, et aussi pour l'organisation du terrain et des analyses entre les laboratoires.

Je voudrais remercier Eric Gaume, Olivier Fouché d'avoir accepté de relire cette thèse et d'en être rapporteurs. La version finale de ce mémoire a bénéficié de leur lecture très attentive et de leurs remarques précieuses.

Je tiens à remercier Régis Moilleron d'avoir accepté d'être examinateur. Je remercie également mes invités : Nicolas Calon et Dimitri Deneele d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail.

Je remercie Alain Robinet et Gilles Saussine pour m'avoir accueillie au sein de SNCF Réseau -DGII-VA-CIR où la thèse a été établie.

Je remercie tous les collègues de SNCF Réseau et d'ENPC/Leesu pour leurs partages de connaissances professionnelles et leur accueil amical. Je remercie spécialement Damien Nivon, Sylvain Lassalle, Christian Kurek, Sanae El-Janyani, Loïc Moulin, Mohammed Saad, Philippe Dubois et Damien Tedoldi pour leurs aides à mes travaux. Je remercie particulièrement Annick Piazza pour son accompagnement professionnel et personnel et son amitié et nos échanges m'ont permis de mieux comprendre la culture française.

Je voudrais remercier aussi tous les thésards croisés au sein de SNCF Réseau et aux laboratoires (Leesu, IMN) pour leurs partages d'expériences et leurs encouragements.

Enfin, Je remercie ma famille, mes amies qui m'ont soutenue tout le long de cette thèse. Je remercie également tous ceux que j'ai croisés et que je n'ai pas nommés, mais je vous remercie du fond du cœur.



## Résumé

Ce travail s'intéresse au phénomène de colmatage créé par la précipitation de la calcite dans les dispositifs des systèmes de drainage du réseau ferroviaire en particulier des lignes à grande vitesse (LGV). En effet, le colmatage de ces drains peut indirectement affecter la tenue géométrique de la voie. Maintenir les équipements hydrauliques dans leur état de fonctionnement optimal est un enjeu fort pour SNCF Réseau. L'objectif de cette recherche est de déterminer les processus et causes de l'entartrage et sa cinétique, en intégrant l'environnement naturel (géologie) et ferroviaire (matériaux anthropiques) ainsi que les types de dispositifs de drainage. La finalité de cette recherche est un double enjeu industriel: préventif et curatif.

Les dysfonctionnements de ces dispositifs que ce soit en pleine voie ou en tunnel entraînent en effet une présence d'eau dans les structures d'assise des voies ferrées pouvant provoquer une dégradation de leurs caractéristiques mécaniques, et à terme induire des défauts de nivellement de rail pouvant mener à des impacts sur les circulations. L'obstruction des dispositifs de drainage par des dépôts carbonatés précipités est une cause majeure de réduction de la fonctionnalité de ces dispositifs sur le RFN : 546,8 km de linéaire de LGV (LN1 à LN6) sont potentiellement soumis à cet impact. Sur certaines lignes, cet impact est important. Par exemple, on a estimé que sur 78 km (LN2) de linéaire de LGV drainée par un collecteur drainant (CD), que le colmatage des CD lié à la précipitation de dépôts carbonatés pouvait représenter jusqu'à 80 % des cas de dysfonctionnement du drainage.

Les techniques actuelles utilisées sont l'hydrocurage ou le marteau piqueur pour les dépôts très durcis mais tous les deux de faible rentabilité au vu du linéaire potentiellement colmaté. Afin de proposer des solutions innovantes de conception ou de traitement adaptées, l'étude des mécanismes en jeu a fait l'objet d'une campagne de mesures de plus de deux ans sur un site pilote de LGV (Chauconin, 77) instrumenté à cet effet permettant l'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau drainée ainsi que celle des dépôts précipités dans leur contexte géologique, géotechnique et hydrométéorologique. Cette approche a été complétée par l'étude de 8 sites complémentaires choisis en pleine voie et en tunnels à l'échelle de RFN et présentant une diversité de contextes environnementaux et ferroviaires.

Le modèle hydrogéochimique développé ensuite sur cette base offre la possibilité de reproduire les processus observés sur le site de Chauconin: processus physique (Pluie-Débit) et processus physico-chimique (Modèle Transfert-Réaction), et de quantifier les quantités de dépôts prévisibles à terme dans les dispositifs. Ce modèle conceptuel est basé sur un modèle hydrologique empirique de deux réservoir de terrain en couplant les processus transport et réaction (dissolution – précipitation).

Les premières analyses d'eau et de matériaux encaissants sur le site de Chauconin montrent que, en absence d'une nappe drainée, celle-ci est riche en calcium et sulfates. L'analyse fine des matériaux montre qu'une partie des matériaux rapportés utilisés dans la fondation de la plateforme ferroviaire contient du gypse dont la dissolution par l'eau d'infiltration pourrait expliquer la composition de l'eau du drainage. Les eaux sur les sites supplémentaires que soit avec présence de nappe permanente ou temporaire, sont essentiellement calcium carbonate. La composition de ces eaux est cohérente avec la géologie calcaire.

Le modèle développé peut être extensible à d'autres sites ferroviaires comme tunnels. A ce stade de notre travail de recherche, nous proposons donc un outil d'aide à la décision à double objectif : diagnostic du risque de précipitation de calcite et justification du choix des typologies de solutions techniques préventives ou curatives.

# *Abstract*

This thesis focuses on the clogging phenomenon linked to the precipitation of calcite in high-speed line (HSL) drainage systems. Indeed, the clogging of these drains can affect the geometric behavior of the track. Maintaining hydraulic devices in its optimal operating condition is a major challenge for SNCF Réseau. The objective of this research is to determine the processes and causes of calcite formation and its kinetics, by integrating the natural environment (geology) and railway context (anthropogenic materials) as well as the types of drainage devices. The purpose of this research has double industrial goals: preventive and curative.

The dysfunction of the devices of the HSL drainage systems, whether along the track or in the tunnel, cause the presence of water in the foundation of the tracks, which can lead to a degradation of their mechanical characteristics, and in the long term induce rail levelling that can lead to impacts on traffic. The clogging of drainage devices by precipitated carbonate deposits is a major cause of reducing the functionality of these devices on the French Railway Networks (RFN): 546.8 km of HSL (Line 1 to 6) are potentially under this impact. In some ways, this impact is essential. For example, it has been estimated that over 78 km (HSL 2) of HSL equipped with draining collector, that the clogging of the devices related to the precipitation of carbonate deposits could represent up to 80% of cases of drainage dysfunction.

The current techniques used are the hydrocuring or the jackhammer for very hardened deposits but both of low profitability in view of the potentially clogged kilometers. In order to propose innovative design or treatment solutions adapted to the different site contexts, the study of the mechanisms involved was the subject of a site monitoring lasting more than two years at a HSL pilot site (Chauconin, 77) instrumented for this purpose allowing the analysis of the physico-chemical parameters of the drained water as well as that of precipitated deposits in their geological, geotechnical and hydrometeorological context. This approach was complemented by the study of 8 other complementary sites selected in full-scale of RFN including tunnels under variant geology as well as covering all existing drainage devices in the railway infrastructure.

The hydrogeochemical model developed on this basis offers the possibility of reproducing the processes observed on the Chauconin site: the physical process (Rain-Flow) and the physicochemical process (Transfer-Reaction Model) according to their context in order to quantify predictably the deposits in the drainages devices. This conceptual model is based on an empirical hydrology model of two ground

reservoir by coupling the processes of transfer and reaction (dissolution - precipitation).

The first analysis of water and surrounding materials on the Chauconin site show that, in the absence of a drained aquifer, this drained water is rich in calcium and sulphates. The detailed analysis of the materials shows that some of the reported materials used in the foundation of the railway platform contain gypsum whose dissolution by infiltration water could explain the composition of the drained water. The waters on the additional sites with a presence of permanent or temporal aquifer are essentially calcium carbonate. These drained waters are consistent with their calcareous or Gypsums geology.

The developed conceptual model could be expanded to other railway sites as tunnel. At this stage of our research work, we propose a conceptual decision-making tool with two objectives: diagnosis the calcite precipitation and justification of the choice of typologies of solutions.

# TABLE DES MATIÈRES

## INTRODUCTION - 23 -

## CHAPITRE1 CONTEXTE INDUSTRIEL ET PROBL MATIQUE - 25 -

- 1.1 LE R SEAU FERR FRAN AIS - 25 -
  - 1.1.1 *Généralité - 25 -*
  - 1.1.2 *Le réseau de la ligne à grande vitesse - 25 -*
- 1.2 LA VOIE FERR E - 26 -
  - 1.2.2 *Les évolutions de la voie ferrée - 31 -*
- 1.3 LES SYST MES DE DRAINAGES FERROVIAIRES - 33 -
  - 1.3.1 *Répartition des différents dispositifs de drainage longitudinaux sur LGV - 34 -*
  - 1.3.2 *Généralité sur le dysfonctionnement des dispositifs de drainages profonds - 35 -*
- 1.4 PROBL MATIQUE D'ENTARTRAGE DES DISPOSITIFS DES DRAINAGES PROFONDS - 36 -
  - 1.4.1 *L'entartrage à l'origine du dysfonctionnement des drainages - 36 -*
  - 1.4.2 *Etat de l'art de la problématique et ses conséquences pour SNCF Réseau - 38 -*
- 1.5 CONCLUSION - 43 -

## CHAPITRE2 BIBLIOGRAPHE - 45 -

- 2.1 G N RALIT S ET L' QUILIBRE DU SYST ME CALCO-CARBONIQUE - 45 -
  - 2.1.1 *Eléments majeurs et mineurs dans l'eau de la nature - 45 -*
  - 2.1.2 *Equilibres calco-carboniques - 46 -*
- 2.2 CIN TIQUE DE DISSOLUTION – PR CIPITATION DE LA CALCITE - 52 -
  - 2.2.1 *Notions de base - 52 -*
  - 2.2.2 *Equations de la cinétique de dissolution – précipitation de calcite - 55 -*
  - 2.2.3 *La cinétique de la précipitation-cristallisation de calcite - 58 -*
- 2.3 LES FACTEURS CONTR LES – RECHERCHES ET APPLICATIONS INTERNATIONAUX - 60 -



- 2.3.1 *Les paramètres thermodynamiques - 60 -*
- 2.3.2 *Les paramètres hydrodynamiques - 62 -*
- 2.3.3 *Synthèses des différents paramètres - 64 -*
- 2.3.4 *Vocabulaires de calcite précipitée dans divers domaines - 69 -*
- 2.4 EPILOGUE : D FINITION SCIENTIFIQUE DE LA PROBL MATIQUE FERROVIAIRE - 70 -

### **CHAPITRE3 OBJECTIFS DE LA TH SE - 73 -**

- 3.1 ANALYSE DES ENJEUX INDUSTRIELS - 73 -
- 3.2 OBJECTIFS INDUSTRIELS - 74 -
- 3.3 OBJECTIF SCIENTIFIQUE - 76 -
- 3.4 D MARCHE SCIENTIFIQUE AU SERVICE DES OBJECTIFS INDUSTRIELS - 77 -
- 3.5 D MARCHE DE LA TH SE - 78 -
  - 3.5.1 *Approche expérimentale - 78 -*
  - 3.5.2 *Approche par modélisation - 79 -*
- 3.6 D FINITION DU SYST ME DE DRAINAGE FERROVIAIRE - 80 -
- 3.7 UN SITE PILOTE ET 8 SITES FLASHS - 81 -
  - 3.7.1 *Choix d'un site pilote : Chauconin - 81 -*
  - 3.7.2 *Choix des sites flashes - 84 -*
- 3.8 EPILOGUE DU CHAPITRE - 84 -

### **CHAPITRE4 PR SENTATION DU SITE PILOTE – CHAUCONIN (77) - 87 -**

- 4.1 LOCALISATION G OGRAPHIQUE - 87 -
- 4.2 CONTEXTE NATUREL - 87 -
  - 4.2.1 *Hydrologie - 87 -*
  - 4.2.2 *Géologie - 88 -*
  - 4.2.3 *Hydrogéologie - 92 -*
- 4.3 CONTEXTE FERROVIAIRE - 93 -

- 4.3.1 *Tracé de la ligne LGV - 93 -*
- 4.3.2 *Plateforme ferroviaire - 94 -*
- 4.3.3 *Bassin versant au droit de la voie - 96 -*
- 4.3.4 *Drainage des eaux dans le bassin versant ferroviaire - 98 -*
- 4.4 UN SYSTÈME INSTRUMENT ET TROIS SYSTÈMES DE COMPARAISON - 101 -
- 4.5 PRÉSENTATION DU COLLECTEUR DRAINANT INSTRUMENT - 103 -
  - 4.5.1 *Position et géométrie - 103 -*
  - 4.5.2 *Niveau d'entartrage du collecteur drainant - 104 -*
- 4.6 MISE À JOUR DU SYSTÈME DE CD - 108 -
  - 4.6.1 *Réactivation des fonctionnalités du collecteur par hydrocurage - 108 -*
  - 4.6.2 *Anomalies observées dans le CD suite à l'hydrocurage - 109 -*
- 4.7 CONCLUSION - 111 -

## **CHAPITRE 5 L'INSTRUMENTATION ET L'EXPÉRIMENTATION - 113 -**

- 5.1 OBJECTIFS DE L'INSTRUMENTATION ET DE L'EXPÉRIMENTATION - 113 -
- 5.2 STRATÉGIE ET QUESTIONS TECHNIQUES - 114 -
- 5.3 CHOIX DES MATÉRIELS ET MÉTHODES D'ÉTUDE - 116 -
  - 5.3.1 *Aspects physiques - 116 -*
  - 5.3.2 *Aspects chimiques - 116 -*
- 5.4 L'INSTRUMENTATION DU SITE - 118 -
  - 5.4.1 *Chronologie de l'instrumentation - 118 -*
  - 5.4.2 *Localisation des capteurs, caractéristiques et fréquences mesurées - 120 -*
- 5.5 MÉTHODE D'ANALYSE DE L'EAU ET DES SOLIDES - 126 -
- 5.6 EXPÉRIMENTATION DU SITE - 128 -
  - 5.6.1 *Test de l'évolution de la chimie lors de l'ouverture du regard S9 - 128 -*
  - 5.6.2 *Test de l'évolution de la chimie au cours d'un épisode de la pluie - 130 -*
  - 5.6.3 *Test d'estimation de la vitesse de formation des dépôts carbonatés - 131 -*

5.7 CONCLUSION - 132 -

## **CHAPITRE6 R SULTATS - 133 -**

6.1 R SULTAT DE L'INSTRUMENTATION ET DES EXPERIMENTATIONS SUR LE SITE PILOTE DE CHAUCONIN - 133 -

6.1.1 *Résultats sur le compartiment sol - 133 -*

6.1.2 *Résultats sur le compartiment eau - 139 -*

6.2 ANALYSE DES R SULTATS DES SITES SUPPL MENTAIRES TUDI S - 162 -

6.2.1 *Présentation des sites - 163 -*

6.2.2 *Comparaison des contextes de sites - 164 -*

6.3 EPILOGUE DU CHAPITRE - 172 -

## **CHAPITRE7 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU CD - 175 -**

7.1 ANALYSE DE L'EAU DRAIN E PAR LE CD (CHAUCONIN) - 175 -

7.1.1 *Faciès et ions principaux de l'eau du CD - 175 -*

7.1.2 *Etat thermodynamique de l'eau du CD vis-à-vis de la calcite - 177 -*

7.2 RECHERCHE DE L'ORIGINE DE L'EAU DU CD PAR MOD LISATION INVERSE - 181 -

7.2.1 *Choix du logiciel à utiliser - 181 -*

7.2.2 *Sursaturation des phases minérales et précipitation de la calcite - 182 -*

7.2.3 *Le CD : un système ouvert ou fermé ? - 184 -*

7.3 RECHERCHE PAR MOD LISATION DE L'ORIGINE DES EAUX QUI ALIMENTENT LE CD. - 187 -

7.4 SIMULATION DE L'ORIGINE DE L'EAU DU CD PAR LA MOD LISATION INVERSE - 190 -

7.5 CONCLUSIONS PR LIMINAIRES SUR LE SYST ME DU CD - 193 -

7.5.1 *Thermodynamique de l'ensemble de l'eau analysée - 193 -*

7.5.2 *Origine de l'eau d'alimentation du CD - 194 -*

## **CHAPITRE8      HYDRODYNAMIQUE ET HYDROCHIMIE DU SYST ME DE DRAINAGE - 195 -**

- 8.1      DIFF RENTS TYPES D' COULEMENT ET FRACTIONS VOLUMIQUES TH ORIQUES - 195 -
- 8.2      ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE DU SYST ME. - 199 -
- 8.3      ANALYSE DU FONCTIONNEMENT PHYSICO-CHIMIQUE DU SYST ME - 212 -
  - 8.3.1      *Un système à l'air libre - 212 -*
  - 8.3.2      *Un système partiellement fermé vis-à-vis du CO<sub>2</sub> à petite échelle de temps - 213 -*
  - 8.3.3      *La température de l'eau du CD et de son environnement - 216 -*
- 8.4      PR ANALYSES SERVANT    CONSTRUIRE UN MOD LE CONCEPTUEL. - 217 -
  - 8.4.1      *Définition d'un épisode pluvieux avec intégration de l'hydrochimie du CD - 217 -*
  - 8.4.2      *Processus constitutifs servant à construire le modèle - 220 -*
- 8.5      JUSTIFICATION ET QUANTIFICATION DU SOUS SYST ME PHYSIQUE - 221 -
  - 8.5.1      *Un système à deux réservoirs : le modèle GR4H\_Drain - 221 -*
  - 8.5.2      *Conditions limites et conditions initiales des simulations sur le site de Chauconin - 222 -*
  - 8.5.3      *Simulation de GR4H-Drain - 226 -*
- 8.6      FONCTIONNEMENT HYDROCHIMIQUE DU SYST ME - 228 -
- 8.7      EPILOGUE DU CHAPITRE - 231 -

## **CHAPITRE9      MOD LISATION COUPL E DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE ET PHYSICO- CHIMIQUE DU SITE DE CHAUCONIN - 233 -**

- 9.1      CONCEPTION D'UN MOD LE COUPL POUR LA QUANTIFICATION DES PROCESSUS - 234 -
- 9.2      FRACTIONS DU CALCIUM DISSOUT DANS LES COULEMENTS RAPIDE ET LENT - 235 -
- 9.3      SIMULATION DYNAMIQUE DE LA G OCHIMIE - PHREEQC - 240 -
  - 9.3.1      *Mise en route dumodèle conceptuel dans PHREEQC - 240 -*
  - 9.3.2      *Résultats des simulations du modèle couplé - 252 -*
- 9.4      QUANTIT DE CALCITE PR CIPIT E - 263 -
  - 9.4.1      *Dynamique de [Ca<sup>2+</sup>] simulée et formation de calcite selon les scénarios 1 et 2 - 263 -*

9.4.2 *Dynamique de [Ca<sup>2+</sup>] simulé et formation de calcite selon le scénario 3 - 267 -*

9.5 EPILOGUE DU CHAPITRE - 269 -

## **CHAPITRE10 APPLICATION OPERATIONNELLE – OUTIL D'AIDE LA DECISION - 271 -**

10.1 FACTEURS SOULIGNÉS ET LEURS VALEURS DE SEUIL - 271 -

10.2 OUTIL D'AIDE LA DECISION - 272 -

10.3 IDENTIFICATION DES CAS COMPARABLES CHAUCONIN ET SOLUTIONS ASSOCIÉES - 277 -

10.3.1 *Contenu et structure de la base de données - 277 -*

10.3.2 *Détails et exemples de fiche standard d'entrées des données - 278 -*

## **CONCLUSION GÉNÉRALE - 288 -**

## **BIBLIOGRAPHIE - 290 -**

ANNEXE1 : COUPES TRANSVERSALES DE LA VOIE LA POSITION P1 ET P2 - 308 -

ANNEXE2 : DESCRIPTIONS DES CAROTTES LA POSITION P1, P2, ET P3 - 309 -

ANNEXE3 : DIFFRACTOGRAMMES SELON GROUPES DE MATÉRIAUX - 313 -

ANNEXE 4 : CAMPAGNE D'ANALYSE D'EAU- CHAUCONIN - 316 -

ANNEXE5 : DYNAMIQUE D'EAU ET CINÉTIQUE DU DPT 321

ANNEXE 6 : 8 SITES FLASHS 323

ANNEXE7 : ANALYSE D'EAU – TAT THERMODYNAMIQUE - CHAUCONIN - 387 -

# LISTES DE FIGURES

Figure 1: Réseau LGV et lignes étudiées dans la thèse.....	- 26 -
Figure 2: Distribution de la charge du train sur la plateforme ferroviaire.....	- 27 -
Figure 3: Eclaté de voie (armement hors traverse).....	- 28 -
Figure 4: Positionnement des plateformes terrassement/ferroviaire sur lignes nouvelles.....	- 29 -
Figure 5: Coupe de la voie sur dalle.....	- 32 -
Figure 6: Drainages ferroviaires (longitudinaux et transversaux).....	- 34 -
Figure 7: Répartition en pourcentage de linéaire des CD/ FBPB/Fossé en déblai.....	- 35 -
Figure 8: Concrétions calcaires constatées dans les drainages de LGV et en tunnel de ligne classique.....	- 37 -
Figure 9 : Système calco – carbonique et ses paramètres.....	- 50 -
Figure 10 : Pouvoir tampon ( $\beta$ pH) des systèmes carbonatés –diagramme de Sillen à 25°C.....	- 51 -
Figure 11 : diagramme de Sillen à 25°C – système ouvert à PCO <sub>2</sub> atm et présence de calcite.....	- 51 -
Figure 12 : Dissolution – précipitation – cristallisation de la calcite.....	- 52 -
Figure 13 : Les contributions du pH et PCO <sub>2</sub> à la vitesse de dissolution de calcite à 25°C.....	- 65 -
Figure 14: Conséquences de l'entrartrage des drainages et synthèse des études menées dans la thèse en support des enjeux industriels.....	- 78 -
Figure 15: Diagramme du système de Collecteur Drainant.....	- 80 -
Figure 16 : Situation géographique des sites testés – Un site pilote et 8 sites flashes.....	- 82 -
Figure 17: Localisation du site pilote -Chauconin (77).....	- 87 -
Figure 18 : Bassin versant naturel sur le site de Chauconin – carte réalisée dans le logiciel IRIP.....	- 88 -
Figure 19: Extrait de la carte géologique de Meaux au 50 000ème (BRGM, File XXIV-13) et position des sondages.....	- 89 -
Figure 20 : Profil géologique/hydrogéologique – Chauconin (77) obtenu à partir des sondages géotechniques (2003,2013). -	- 92 -
Figure 21: Coupe transversale de la plateforme ferroviaire – Chauconin, déblai 505.....	- 94 -
Figure 22: Schématisation des bassins versants naturel ( PK 17 à 21) et ferroviaire (PK 19 à 20)- Chauconin (77).....	- 97 -
Figure 23: Drainages longitudinaux - Voie 2- pk 18 à 20 - Chauconin (77).....	- 100 -
Figure 24: Coupes transversales schématiques des drainages longitudinaux du déblai 505, et du remblai 504 - Chauconin (77).....	- 101 -
Figure 25: Caractéristiques du CD_tronçon2 choisi pour l'instrumentation-Chauconin (77).....	- 104 -
Figure 26: Schéma longitudinal du collecteur (S1 à S10) - Chauconin.....	- 105 -
Figure 27: Profil en long du collecteur drainant -Chauconin (77)- 04/2014.....	- 105 -
Figure 28: Etat initial du colmatage du collecteur drainant (CD_tronçon2) - Chauconin (77)- 05/2013.....	- 106 -
Figure 29: Etat du collecteur drainant CD_tronçon2 avant (fév.2013) et après hydrocurage (2014) - Chauconin (77).....	- 109 -

Figure 30: Caractéristiques du système étudié - Chauconin (77).....	- 112 -
Figure 31: Chronologie d'instrumentation du site test de Chauconin (77).....	- 119 -
Figure 32: Plan d'instrumentation des capteurs physico-chimiques-Chauconin (77).....	- 121 -
Figure 33: Système théorique (a) de mesure du débit à l'exutoire (Nivus) adapté au site de Chauconin (b).....	- 123 -
Figure 34: Instrumentation dans le regard S9 -Chauconin (77).....	- 125 -
Figure 35 : Schéma du test in situ – dynamique de CO <sub>2</sub> air –dissout au niveau du regard.....	- 130 -
Figure 36: Test in situ – mesure de la masse des dépôts au cours du temps.....	- 131 -
Figure 37 : Coupe du sol le long de la voie TGV, position des sondages géotechniques.....	- 133 -
Figure 38 : Coupe transversale du CD avec affichage des photos des matériaux encaissants.....	- 134 -
Figure 39 : Représentation synthétique des évènements pluvieux observés-Chauconin.....	- 143 -
Figure 40 : Dynamique des précipitations et des hauteurs d'eau dans les piézomètres P1, P2 et P5 - Chauconin.....	- 144 -
Figure 41 : Dynamique de la pluviométrie et des hauteurs dans les piézomètres sur le site de - Chauconin – Chroniques de mars 2015.....	- 145 -
Figure 42 : Mesure des débits du collecteur drainant entre 2014 et 2016.....	- 146 -
Figure 43 : Exemples de relations pluie- débit. Zoom sur les 6 pics de l'hydrogramme- –juillet 2014 Chauconin.....	- 148 -
Figure 44 : Représentation de la séparation d'un hydrogramme – données du 06/07/2014 au 08/07/2014.....	- 149 -
Figure 45: L'acquisition de la température de l'eau du CD – regard S9 -Chauconin.....	- 154 -
Figure 46 : Synthèse et comparaison de la pression de CO <sub>2</sub> interne et externe de l'eau du CD.....	- 155 -
Figure 47: Extrait des données d'une série de paramètres physico-chimiques – 2014.....	- 156 -
Figure 48: DRX des dépôts dans le CD instrumenté (CD_tronçon2) –Chauconin.....	- 157 -
Figure 49 : dépôts échantonnés dans le FTR –Chauconin.....	- 159 -
Figure 50: dépôts échantonnés dans le CD_tronçon1 situé dans Déblais D503 -Chauconin.....	- 160 -
Figure 51: dépôts échantonnés dans le FBPB -Chauconin.....	- 161 -
Figure 52: Comparaison de la chimie de l'eau des sites étudiés.....	- 171 -
Figure 53 Signature chimique des eaux du collecteur drainant à Chauconin - période 2013 - 2015 (5 campagnes). a) Diagramme de Piper –b) Diagramme de Stabler, proportion des ions majeurs de l'eau du CD (moyenne).....	- 176 -
Figure 54 : Caractérisation de l'eau du CD –Chauconin.....	- 178 -
Figure 55 : Contribution des ions à la conductivité d'un échantillon (S1, 2 juin 2014) de l'eau du CD –Chauconin.....	- 179 -
Figure 56 : Evolution de la dureté de l'eau le long du CD –Chauconin.....	- 180 -
Figure 57 : Formes du calcium et du carbone dans l'eau du CD - regard S3 du 08/07/2015-Chauconin.....	- 182 -
Figure 58 : Indice de saturation des phases minérales de l'eau du CD - regard S3 du 08/07/2015-Chauconin.....	- 183 -
Figure 59 : L'évolution de l'eau du CD en fonction du pH- simulation thermodynamique.....	- 186 -
Figure 60 : Composition chimique de l'eau de pluie(Pluie_Etat 0) et de l'eau de pluie en équilibre avec les matériaux encaissant et l'eau du CD. a) eau de pluie en contact avec le matériau drainant (MD). b) eau de pluie en contact avec le matériau de plateforme (MP) avec (1%) ou sans chaux.....	- 189 -

Figure 61 : Bilan des dissolutions-précipitations des phases solides.....	- 190 -
Figure 62 : Comparaisons des espèces dissoutes dans différentes eaux par mesure et simulation.....	- 190 -
Figure 63 : théorie des parcours d'eau interne de la plateforme- Chauconin.....	- 196 -
Figure 64 : Hyétogramme et hydrogramme théoriques d'un épisode pluie-débit à Chauconin.....	- 198 -
Figure 65 : débit de pic/décruce/base/avant pluie en fonction de pluie (durée/somme/intensité du pic).....	- 204 -
Figure 66 : débit de décrue/base/avant pluie en fonction de débit pic/décruce/base.....	- 205 -
Figure 67 : Caractéristiques des Pluies – 3 catégories découpées en fonction de la durée de pluie.....	- 205 -
Figure 68 : Caractéristiques des hydrogrammes du CD – 4 catégories distinguées en fonction de fin de décrue (18,5 h) et de temps de montée (8h).....	- 206 -
Figure 69 : Corrélation entre les temps de l'évolution de la chimie et les temps de l'évolution du débit.....	- 211 -
Figure 70 : Synthèse et comparaison de la pression de l'air interne et externe du CD.....	- 214 -
Figure 71 : Synthèse et comparaison des données de pression partielle de CO2 de l'air et CO2 dissout dans l'eau du CD. -	- 215 -
Figure 72 : Synthèse et comparaison de température interne et externe du CD.....	- 217 -
Figure 73 : L'hydrochimie et l'hydrodynamique du CD d'un épisode effectif en été.....	- 219 -
Figure 74 : L'hydrochimie et l'hydrodynamique du CD au cours d'un épisode efficace en hiver.....	- 220 -
Figure 75 : Diagramme de routage dans le modèle de deux réservoirs.....	- 222 -
Figure 76: simulation pluie-débit- Chauconin- GR4h_Drain.....	- 227 -
Figure 77: Simulation de la répartition de débits et évolution de la conductivité – juillet 2014.....	- 229 -
Figure 78: Simulation de la répartition des débits et de la conductivité – mars 2015.....	- 231 -
Figure 79 : Schéma de fonctionnement du système étudié – Chauconin.....	- 234 -
Figure 80 : Evolution chimique de l'eau entre bassin versant en amont et collecteur drainant – pH/C25/pCO2.....	- 238 -
Figure 81 : Evolution chimique de l'eau entre bassin versant en amont et le collecteur drainant – [Ca2+] et [SO42-].....	- 239 -
Figure 82 : Séquence de modélisation couplée utilisée dans l'étude de Chauconin.....	- 241 -
Figure 83: Algorithme de 1-D transport dans PHREEQC.....	- 244 -
Figure 84 : Découpage en trois sous-systèmes (modèle) – Chauconin.....	- 247 -
Figure 85: Modèle conceptuel du CD de Chauconin dans PHREEQC.....	- 249 -
Figure 86: couplage de trois sous modèles –modèle conceptuel de Chauconin.....	- 251 -
Figure 87: test de sensibilité des paramètres hydrauliques du modèle 1-D transport vis-à-vis de la chimie (pH) sous débit injecté constant.....	- 254 -
Figure 88: test du mode d'entrée des données de pluie du modèle 1-D transport.....	- 255 -
Figure 89: pH simulation des cas de scénario1- pH chute dans l'écoulement rapide.....	- 259 -
Figure 90: pH simulation selon scénario2 –pH remonté sous l'écoulement lent.....	- 261 -
Figure 91: simulation de l'évolution du pH selon cinq types de scénarios 2.....	- 262 -
Figure 92: pH simulé – donnée du 13/06/2014 to 29/06/2014 –scénario 3.....	- 263 -



Figure 93: exploitation du Ca – C – S dans l'eau du CD selon les scénarios 1 et 2.....	- 265 -
Figure 94: estimation de la quantité de la calcite précipité dans l'année par la mesure de lame en verre.....	- 267 -
Figure 95: Ca, S(6) et C(4) simulé – données du 13/06/2014 to 29/06/2014 –scénario 3.....	- 268 -
Figure 96: Principe conceptuel de l'outil d'aide à la décision pour la réduction de l'entartrage.....	- 273 -
Figure 97: Structure conceptuelle de l'outil d'aide à la décision.....	- 274 -
Figure 98: Structure et contenu de la base de donnée de l'outil d'aide à la décision.....	- 276 -
Figure 99: Principes du module de résultat de l'outil d'aide à la décision.....	- 277 -
Figure 100 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons des limons.....	- 313 -
Figure 101 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons de Calcaire Saint Ouen.....	- 313 -
Figure 102 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons de la sous couche et CDF.....	- 314 -
Figure 103 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons du limons traités.....	- 314 -
Figure 104 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons des graviers cimenté.....	- 315 -
Figure 105 : Diffractogrammes des matériaux drainants côté CD et masque drainant côté FBPB.....	- 315 -
Figure 106 : Extraits Pluie-débit –zoom des 9 pics d'hydrogramme- 02/2015-Chauconin.....	322
Figure 107: Schéma de principe du système de drainage et plan d'échantillonnage sur le site de Soignolles.....	331
Figure 108: schéma de principe du système de drainage et plan d'échantillonnage sur le site de Connerré.....	335
Figure 109: Analyse DRX- dépôts carbonatés dans le CD sur le site de Connerré.....	337
Figure 110: Carte géologique du tunnel de Marseille (BRGM, 1/25 000).....	339
Figure 111: Coupe schématique du site de du tunnel de Marseille (d'après IGN et BRGM).....	342
Figure 112: Caniveau du Tunnel de Marseille au PM 436-V1.....	343
Figure 113: Sachet de pastilles dans le caniveau du tunnel de Marseille.....	343
Figure 114: Schéma de principe du système de drainage et plan d'échantillonnages sur le site de Marseille.....	344
Figure 115: Analyse DRX- dépôts carbonatés de fossé dans tunnel de Marseille.....	346
Figure 116: Carte de la géologie du tunnel de La Motte (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000).....	348
Figure 117: Coupe du sol autour de tunnel de La Motte.....	349
Figure 118: Plan d'échantillonnages dans le tunnel Le Motte.....	352
Figure 119: Analyse DRX- dépôts du fossé dans le tunnel La Motte.....	353
Figure 120: Carte de la géologie autour du tunnel de Nantilly (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000).....	355
Figure 121: Coupe du sol autour de tunnel de Nantilly.....	356
Figure 122: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Nantilly.....	358
Figure 123: Photos - dépôts en parois et en canivaux - tunnel Nantilly.....	359
Figure 124: Analyse DRX- dépôts de caniveau de piedroit dans le tunnel de Nantilly.....	361
Figure 125: Analyse DRX d'échantillons de sol issus d'une ancienne campagne géotechnique - tunnel de Nantilly.....	362

Figure 126: Carte e la géologie autour du tunnel de Caluire (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000).....	364
Figure 127: Coupe du sol autour de tunnel de Caluire.....	365
Figure 128: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Caluire.....	368
Figure 129: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de Caluire.....	367
Figure 130: Carte de la géologie autour du tunnel de La Ramade (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000).....	369
Figure 131: Coupe du sol autour de tunnel de La Ramade.....	371
Figure 132: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de La Ramade.....	374
Figure 133: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de La Ramade.....	376
Figure 134: Carte de la géologie autour du tunnel de Bréval (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000).....	377
Figure 135: Carte piézométrique (ou carte des isopièzes) au niveau de tunnel de Bréval.....	379
Figure 136: Coupe du sol autour de tunnel de Bréval.....	380
Figure 137: Carte du risque de remontée de nappe au niveau de tunnel de Bréval.....	381
Figure 138: Comparaison de l'eau émergée dans Tunnel et celle de nappe Lutécienne.....	382
Figure 139: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Bréval.....	385
Figure 140: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de Bréval.....	- 386 -

# LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Spécificités des granulats utilisés pour la réalisation de voie ferrée.....	- 31 -
Tableau 2 : Résultats de l'étude préliminaire (2013) relative à l'évaluation du linéaire de CD/FBPB/Fossés sur LGV.....	- 35 -
Tableau 3 : Résultats de l'étude préliminaire (2013) relative à l'évaluation du linéaire de CD/FBPB colmaté sur LGV.....	- 38 -
Tableau 4: Fréquence et coût de l'hydrocurage du CD €/km/an.....	- 39 -
Tableau 5: Synthèse des projets de recherche conduits par SNCF Réseau avant 2013.....	- 40 -
Tableau 6: sites ayant fait l'objet des tests dans le cadre des projets OPTIDR et DrainAgeing.....	- 41 -
Tableau 7: équilibres du système de calco-carboniques.....	- 47 -
Tableau 8 : Relation de $[Ca^{2+}]_{eq}$ et $PCO_2$ à 20 °C.....	- 56 -
Tableau 9: Synthèses des modèles/équations de la cinétique de la calcite.....	- 57 -
Tableau 10: Synthèse des constantes de la cinétique trouvées dans la littérature.....	- 59 -
Tableau 11: Synthèses de la cinétique de la cristallisation de la calcite.....	- 59 -
Tableau 12: Synthèse de $K_s$ pour divers formes de $CaCO_3$ dans la littérature.....	- 61 -
Tableau 13: l'effet de la température sur la thermodynamique et la cinétique.....	- 61 -
Tableau 14: Synthèses des études de facteurs hydrodynamique sur $CO_2$ conversion.....	- 63 -
Tableau 15 : Synthèse des sondages effectués entre les PK 17 et 20 de la LGV Est depuis 2003.....	- 90 -
Tableau 16: Caractéristiques des différents systèmes à Chauconin.....	- 102 -
Tableau 17: Etat du collecteur drainant (CD_tronçon2) après 10 ans d'exploitation de la ligne (avant hydrocurage) - Chauconin en février 2013.....	- 107 -
Tableau 18: état de la surface interne du collecteur (CD 2)– visite caméra après curage en 01/2014 - Chauconin.....	- 110 -
Tableau 19: Caractéristiques des piézomètres et positions des capteurs .....	- 121 -
Tableau 20: Synthèse des caractéristiques des capteurs - Chauconin (77).....	- 122 -
Tableau 21: Synthèse des caractéristiques d'échantillonnage et d'analyse de la phase liquide - Chauconin (77).....	- 128 -
Tableau 22: Synthèse de l'échantillonnage et de l'analyse de la phase solide - Chauconin (77).....	- 129 -
Tableau 23: Synthèse des phases minérales (DRX) dans les matériaux in situ –Chauconin (Carottages P1 à P3).....	- 135 -
Tableau 24: Synthèse des analyses au laboratoire des matériaux in situ –Chauconin (P1 à P3).....	- 137 -
Tableau 25: Synthèses des caractéristiques chimiques des matériaux solides –Chauconin (P1 à P3).....	- 138 -
Tableau 26 : Synthèse des données acquises sur le site de Chauconin de 2014 à 2016.....	- 140 -
Tableau 27 : Synthèse des conditions environnementales des 5 campagnes d'échantillonnage - Chauconin.....	- 141 -
Tableau 28 : Présentation synthétique des prélèvements et analyses complémentaires menées sur le site de Chauconin. -	- 141 -
Tableau 29 : Distribution des épisodes de la pluie selon la durée (h) et cumul de la hauteur (mm).....	- 142 -
Tableau 30 : Caractérisation des courbes de décrue des six épisodes de pluie présentés Figure 6 (h-1).....	- 149 -

Tableau 31 : Caractéristiques des matériaux rapportés du déblai D503 -Chauconin .....	- 160 -
Tableau 32 : Synthèse des campagnes et types d'analyses pour les échantillons d'eau et de matériaux des 8 sites flashes tunnels et pleine voie (*).....	- 162 -
Tableau 33 : Comparaison des dispositifs de drainage le long de LGV.....	- 165 -
Tableau 34 : Comparaison des dispositifs de drainage et traitements dans les tunnels.....	- 166 -
Tableau 35 : Chimie de l'eau et caractéristiques des dépôts dans les tunnels et CD de pleine voie.....	- 167 -
Tableau 36 : Comparaison deux à deux des résultats simulés des tests 1 à 4.....	<b>错误！未定义书签。</b>
Tableau 37 : Résultat de la simulation inverse de l'eau du CD pour une source unique d'alimentation à partir de l'eau de pluie :.....	- 192 -
Tableau 38 : Statistiques des caractéristiques volumiques de Pluie – Débit du CD - Chauconin.....	- 201 -
Tableau 39 : Statistiques des caractéristiques temporelles de Pluie – Débit du CD – Chauconin.....	- 201 -
Tableau 40 : Test de corrélation de Pluie – Débit du CD - Chauconin.....	- 203 -
Tableau 41 : Répartition de la pluie dans chaque catégorie de hydrogramme du CD.....	- 207 -
Tableau 42 : Statistiques de caractéristiques temporelles de la chimie d'eau du CD – Chauconin.....	- 209 -
Tableau 43 : Test de corrélation de Pluie – Débit –Chimie du CD - Chauconin.....	- 211 -
Tableau 44 : estimation du temps de séjour de flux rapide et lent dans le sous-système bassin versant - Chauconin.....	- 212 -
Tableau 45 : Statistique de la pCO2 dans l'air et l'eau du CD- Chauconin.....	- 215 -
Tableau 46 : Période démonstrative des processus couvrant toutes les catégories de Pluie-Débit représentatives pour la période - Chauconin.....	- 224 -
Tableau 47 bilan d'eau –Chauconin ( 07/2014 au 03/2016).....	- 225 -
Tableau 48 Paramètres optimisé pour la simulation et critères de Nash.....	- 228 -
Tableau 49 : Synthèse bibliographique des valeurs cinétiques pour les phases minérales trouvées dans l'environnement du CD de Chauconin.....	- 245 -
Tableau 50 : Les variables d'état et de forçage du modèle – Chauconin.....	- 248 -
Tableau 51 : Détails des mises en route des trois sous modèles dans PHREEQC.....	- 250 -
Tableau 52 : Représentations de trois scénarios par modèles couplés dans PHREEQC.....	- 250 -
Tableau 53 : Représentations de trois scénarios dans PHREEQC- version simplifiée.....	- 252 -
Tableau 54 : Les gammes de variation des paramètres physiques utilisés dans.....	- 253 -
Tableau 55: Valeurs retenues pour les paramètres physiques sur la base de l'analyse de sensibilité.....	- 255 -
Tableau 56: Bilan de calcium selon scénario 1 et 2 – donnée de 1550 à 1750 minutes.....	- 265 -
Tableau 57: Bilan de calcium selon scénario 3 – donnée du 13/06/2014 au 29/06/2014.....	- 269 -
Tableau 58 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 1 – Cas de Chauconin.....	- 283 -
Tableau 59 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 2 – cas de Chauconin.....	- 284 -
Tableau 60 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 3 – cas de Chauconin.....	- 285 -
Tableau 61 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 4 – cas de Chauconin.....	- 286 -

Tableau 62 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 5 – cas de Chauconin.....	- 287 -
Tableau 64: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10) – FBPB-FTR – 12/12/2013.....	- 316 -
Tableau 65: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)– 02/06/2014.....	- 316 -
Tableau 66: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)– 19/11/2014.....	- 317 -
Tableau 67: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)- P1- P2-P5– 17/02/2015.....	- 317 -
Tableau 68: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)- FBPB- P1-P5– 17/03/2015.....	- 318 -
Tableau 69: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)- CD (D503)-P5– 08/07/2015.....	- 318 -
Tableau 70: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)- flaue d'eau plateforme et route– 22/09/2015.....	- 319 -
Tableau 71: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-pluie–03/12/2015.....	- 319 -
Tableau 72: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-P1-P5-Pluie– 22/01/2016.....	- 319 -
Tableau 73: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-Pluie– 19/02/2016.....	- 320 -
Tableau 74: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-P1-P5–23/03/2016.....	- 320 -
Tableau 75: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9) suivi du pluie – 03/2016.....	- 320 -
Tableau 76 : Synthèse des campagnes et types d'analyses pour les échantillons.....	329
Tableau 77: Comparaison de la chimie des eaux souterraines avec l'eau dans le tunnel de Marseille.....	342
Tableau 78: Comparaison de la chimie de l'eausouterraine avec l'eau drainée dans le tunnel de la Motte.....	350
Tableau 79: Comparaison de la chimie d'eau souterraine locale avec l'eau dans le tunnel de Nantilly.....	357
Tableau 80: La comparaison de la chimie des eaux à l'intérieur et autour du tunnel de La Ramade.....	372

# Introduction

Depuis les années 1990, SNCF réseau constate que les collecteurs drainants (CD) le long des voies des lignes à grande vitesse (LGV) présentent des problèmes liés à l'entartrage qui cause leur colmatage. Ces dispositifs de drainage sont souvent implantés dans les déblais humides où la nappe est proche de la voie dans le but de la drainer tout en évacuant l'eau de surface.

Le dysfonctionnement de ces dispositifs de drainage peut provoquer une inondation de la plateforme ferroviaire et induire des défauts de portance de cette dernière avec des conséquences sur l'exploitation. Suite à la détection de cette problématique de colmatage, une large campagne d'inspection par caméra dans les collecteurs drainants a été réalisée sur l'ensemble du réseau LGV au début des années 1990 (Courmarcel, 1998). Cette inspection a mis en évidence l'ampleur du phénomène et la nécessité d'agir rapidement. D'après le sondage fait au début de la thèse, le linéaire de CD qui présente un risque de colmatage lié à l'entartrage est estimé à environ 500 km sur le réseau de LGV en France.

Cette problématique est aussi constatée dans les autres dispositifs de drainage de LGV avec un état moins important. Parmi ces dispositifs, on trouve le fossé terre revêtu (FTR), le fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB) et les fossés piédroits dans les tunnels. Pour ce dernier type également constaté sur ligne classique, le développement de l'entartrage peut être très important.

SNCF réseau a pour l'instant engagé plusieurs études : d'une part pour optimiser la conception des collecteurs drainants (Courmarcel, 1998; Meriaux et al., 2013) ou chercher des alternatives (Malhèrbe, 2001a) afin de réduire les risques de colmatage le long de la voie sur les nouvelles lignes ; d'autre part en testant une méthode préventive à travers le traitement chimique de l'eau dans des tunnels du réseau LGV existant. Au cours des dernières années, le REX a pu être consolidé (Malhèrbe, 2001a; Jai, 2013).

Cependant, ces actions ponctuelles nécessitaient l'approfondissement des connaissances pour permettre la mise en place d'une réponse adaptée en terme de politique de maintenance face à une problématique onéreuse, les solutions techniques actuellement utilisées étant peu rentables. C'est donc en appui à cette démarche que le la division Coordination Innovation et Recherche du département Voie et Abords de la Direction Générale Industrielle et Ingénierie de SNCF Réseau a proposé ce travail de thèse démarré en septembre 2013.

La première partie de ce travail relative au contexte industriel et scientifique a consisté en un état de l'art général (chapitre 1) sur la problématique du colmatage des drains dans les contextes industriels en interne et en externe de SNCF Réseau, en France et à l'étranger. Une synthèse des travaux scientifiques sur le mécanisme de formation des concrétions calcaires en eau douce complète cette description dans le chapitre 2.

La deuxième partie présente les matériels et méthodes (chapitre 3) utilisés pour réaliser le diagnostic d'un site pilote (Chauconin) et de 8 sites complémentaires en France (Soignolles, Connerré ; Marseille, La Motte, Nantilly, Caluire, Bréval, La Ramade) présentant une problématique de colmatage. La présentation du contexte du site pilote est détaillée dans le chapitre 4. Les résultats de l'acquisition des données de terrain (analyse de l'eau et des dépôts) sur le site pilote sont détaillés dans le chapitre 5.

La troisième partie présente les résultats et discussions. Le chapitre 6 présente les diagnostics des 9 sites : analyses des liquides et solides ; suivi statique et dynamique, description des mécanismes observés sur le site pilote. Le chapitre 7 synthétise les résultats de la thermodynamique de l'eau. Le chapitre 8 propose une discussion relative à l'acquisition dynamique de la physique et de la chimie de l'eau du CD selon la pluviométrie. Un modèle conceptuel basé sur les processus hydrogéochimiques observés sur le site de Chauconin intégrant la calibration de la cinétique est décrite dans le Chapitre 9 est proposé. Ce modèle permet de déterminer les facteurs aggravants, d'estimer la quantité et la vitesse des carbonates de calcium précipités dans le système d'un CD et peut être adapté aux autres sites.

Le dernier chapitre pose les bases d'un outil d'aide à la décision pour le diagnostic de risque et l'orientation du choix du traitement de l'entartrage dans le contexte ferroviaire.

## **Chapitre1 Contexte industriel et problématique**

### **1.1 Le réseau ferré français**

#### **1.1.1 Généralités**

Le réseau ferré français est le fruit d'une longue histoire industrielle. La première voie est construite en 1827, entre Saint-Étienne et Andrézieux pour le transport du charbon, puis entre Saint-Étienne et Lyon en 1831 pour le premier train de voyageurs. Le réseau ferré actuel compte 30 000 km (SNCF, 2017) de lignes.

Il existe deux type de lignes (SNCF, 2017): les lignes à grande vitesse (LGV) d'un linéaire total de 2 600 km (en sens unique, dont 54 km de tunnels) circulées jusqu'à 320 km/h et les lignes classiques représentant environ 91% du réseau dont la vitesse maximale d'exploitation est de 220 km/h. Ces lignes sont empruntées quotidiennement par 15 000 trains et 5 millions voyageurs (SNCF, 2017).

Née de la fusion entre cinq compagnies privées, aux modes de gestion et de conception différentes, la SNCF, créée en 1937, est devenue le propriétaire et le principal gestionnaire du réseau ferré national français aujourd'hui. Elle assure le double rôle d'exploitant et de mainteneur du réseau.

Depuis 2015, le groupe SNCF est composé de trois établissements publics à caractère industriel et commercial (EPIC) dont « SNCF Réseau » issu du regroupement de SNCF et Réseau ferré France (RFF) qui était depuis 1998 le gestionnaire de l'infrastructure.

La branche SNCF Réseau est chargée de la maintenance et de l'entretien du réseau ferré national (RFN), et de la politique de régénération et de du réseau. Le principal enjeu de SNCF Réseau depuis plusieurs années est d'optimiser ses investissements en termes de maintenance et de développement de son infrastructure dans un objectif de performance de plus en plus exigeant tout en garantissant un haut niveau de sécurité.

#### **1.1.2 Le réseau de lignes à grande vitesse**

Depuis la mise en service du 1<sup>er</sup> train à grande vitesse (TGV) qui relie Paris à Lyon en 1981, (SNCF, 2017), le réseau LGV (Figure 1) aujourd'hui compte dix lignes (LN1 à LN10) en service listées de la plus ancienne à la plus récente dans la figure suivante.





Sources: Documents non -contractuels  
 \* RFF, Gestionnaires d'infrastructure; UIC, Commission Européenne, en 2010  
 \* SNCF Réseau, Atlas du réseau ferré en France, le 30/09/2017

0 100 200 300 km

Figure 1: Réseau LGV et lignes étudiées dans la thèse

## 1.2 La voie ferrée

En préambule de ce chapitre, il convient de présenter la voie ferrée et les constituants qui la composent, afin d'introduire les thèmes abordés dans le cadre de ce mémoire. Selon Alias (1984), une voie ferrée est constituée d'un assemblage de composants, qui transmettent la charge dynamique à la plateforme. La voie supporte les efforts transversaux, longitudinaux et verticaux liés aux circulations (Figure 2).

Sous l'appellation « voie », on distingue d'une part, l'armement (Figure 3), constitué des rails, des semelles, des attaches et des traverses et d'autre part le ballast. L'ensemble repose sur une ou plusieurs couches granulaires formant, avec le ballast, la structure d'assise (Figure 4).

Chaque constituant de l'armement joue un rôle spécifique dans la stabilité de la voie :

**Le rail** : il assure le support vertical des roues des véhicules et guide celles-ci dans le sens transversal.

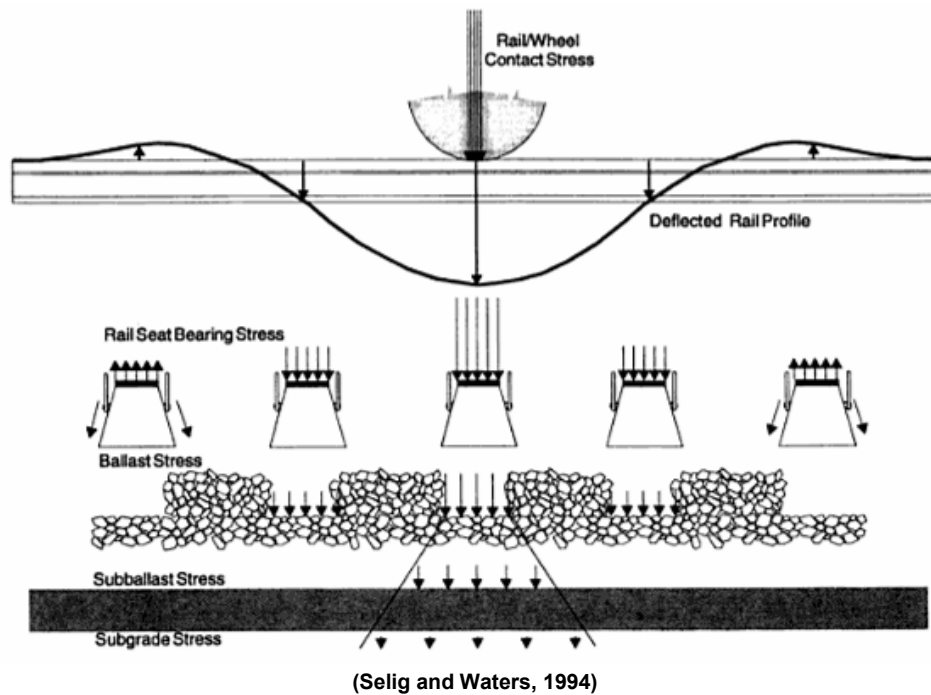


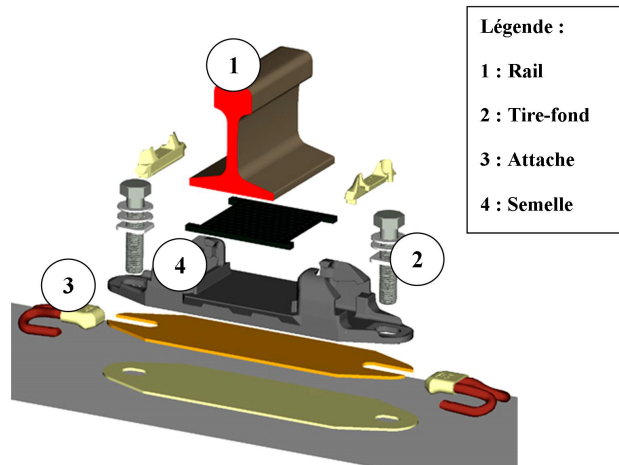
Figure 2: Distribution de la charge du train sur la plateforme ferroviaire

Le rail est fixé sur les blochets des traverses par l'intermédiaire des attaches.

Les attaches rail-traverse : elles permettent la fixation du rail sur la traverse et assurent à la fois une élasticité dans les sens vertical et horizontal.

Les traverses : transmettent les efforts entre le rail et le ballast et assurent le maintien de l'écartement, la transmission des charges dynamiques et statiques du rail au ballast.

Le ballast : Le ballast, défini par la norme NF EN 13450 (AFNOR, 2003), est un granulat provenant du concassage de roches extraites dans des carrières de pierres dures (granite, diorite, rhyolite, quartzite). Il constitue un élément support de la voie et fait partie de la superstructure. La notion de superstructure définit l'ensemble des composants reposant ou se situant au-dessus de la sous couche. Ce terme est en opposition à l'infrastructure qui intègre le sol support, la couche de forme et la sous couche.



(Calon, 2016)

Figure 3: Eclaté de voie (armement hors traverse)

Le ballast a un rôle très important dans le comportement de la voie et il remplit les fonctions suivantes :

- transmettre et répartir les efforts à la plateforme dus aux charges statiques et dynamiques des circulations ;
- absorber les vibrations mécaniques et acoustiques ;
- contenir grâce à la résistance au cisaillement les efforts latéraux (circulation en courbe, flambage consécutif de la dilatation des Longs Rails Soudés (L.R.S.) et longitudinaux (accélération, freinage) ;
- drainer les eaux pluviales.
- Protéger le sol support vis-à-vis du gel.

L'armement et le ballast reposent sur des couches granulaires aux fonctions dédiées. Les structures ferroviaires reposent sur la Partie Supérieure des Terrassements, zone supérieure d'environ 1 m d'épaisseur (de terrains en place ou de matériaux rapportés) dont la surface est appelée arase des terrassements. La géométrie de la structure ferroviaire est constituée de haut en bas de :

La sous couche : Élément de la structure d'assise constitué d'une couche de matériaux grenus bien gradués, insensibles à l'eau et placés sous le ballast. Elle peut comporter à sa base un géotextile de séparation, pour éviter sa contamination par des fines.

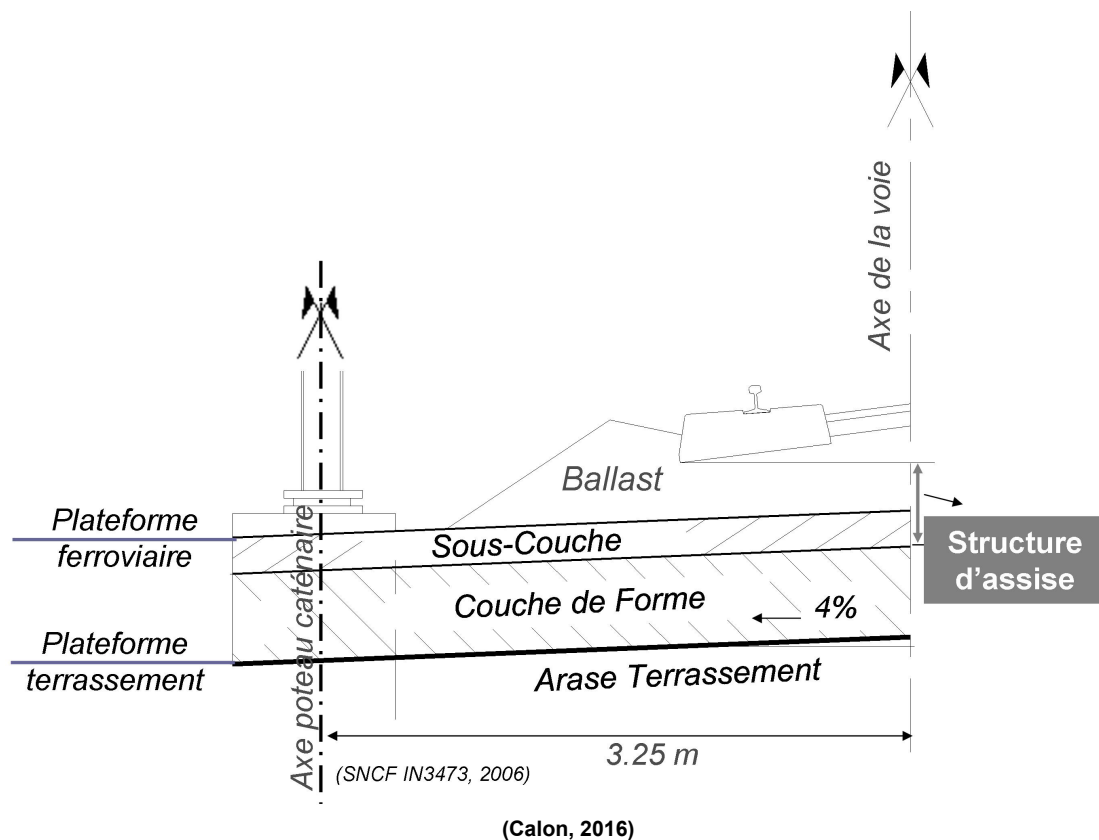


Figure 4: Positionnement des plateformes terrassement/ferroviaire sur lignes nouvelles

La couche de forme : La couche de forme est une couche de sol granulaire permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place. Elle permet ainsi d'obtenir à sa surface des caractéristiques mécaniques homogènes permettant de dimensionner les structures d'assise. Elle contribue par ailleurs à mettre hors gel le sol support et à drainer les eaux d'infiltration vers les systèmes de drainage.

Elle est dite « normale » si le sol en place fait office de couche de forme ou « rapportée » si la structure est constituée par des matériaux granulaires rapportés ou par du sol traité.

La structure d'assise assure, vis-à-vis du sol support ou de la plateforme de terrassement, la répartition, en complément du ballast et de la traverse, des charges transmises au niveau du sol. De plus, elle permet d'assurer la séparation granulométrique jusqu'au ballast et la protection vis-à-vis du ruissellement des eaux de pluie qui s'infiltrent à travers le ballast ainsi que la protection, du sol support, contre le gel. Les fonctions allouées à la structure d'assise ont toujours été les mêmes depuis l'origine du chemin de fer en France dans les années 1850, jusqu'à l'avènement des Lignes à Grande Vitesse

(LGV) dans les années 1980. Seule sa constitution a évolué en fonction des besoins (vitesse et charge) et des techniques, c'est de cette modification que traitera le chapitre suivant.

Afin de rester succinct dans les aspects techniques de la structure d'assise ferroviaire, les parties suivantes détailleront exclusivement la partie liée à la LGV. La ligne classique ne sera pas traitée car elle ne concernait pas directement cette thèse.

#### *1.2.1.1 Aspect dimensionnel des couches d'assise de la voie ballastée*

Les structures de LGV sont bien identifiées ; leurs caractéristiques géométriques et mécaniques sont décrites dans les référentiels du Réseau Ferré de France (SNCF, 2006). Ainsi, la sous couche est définie comme étant une couche de matériaux granulaires bien gradués, insensible à l'eau et intercalée entre le ballast et la plateforme de terrassement, sur une épaisseur comprise entre 0,15 m et 0,55 m.

Les structures de ligne nouvelle sont constituées de haut en bas par :

Le ballast : qui est à l'interface entre la superstructure et l'infrastructure. Tout en faisant partie intégrante de la voie, il joue un rôle dans les structures d'assises. La couche supérieure (15 - 20 cm sous traverse), dite de bourrage, assure le calage des traverses, et doit être composée d'un matériau anguleux. Les matériaux roulés, difficiles à bourrer doivent être éliminés.

Les spécifications du ballast (Tableau 1) sont reprises dans la norme EN 13450 (AFNOR, 2003) qui définit entre autres les critères mécaniques tels que : la granularité, la dureté, la résistance à l'attrition en présence ou non d'eau, la propreté.

La sous couche : c'est une couche de transition entre ballast et plateforme. Elle est constituée de matériaux grenus bien gradués permettant un compactage à q1 (100 % de l'Optimum Proctor Modifié OPM) lors de sa mise en œuvre. Elle permet la protection de la partie supérieure de la plateforme contre l'érosion (poinçonnement par le ballast), l'action des eaux zénithales, la protection contre le gel et assure une meilleure répartition des charges transmises. Lors de sa mise en œuvre, la sous couche est pentée transversalement (en toit ou pente unique) vers les dispositifs de drainage longitudinaux pour éviter les zones de rétention d'eau dans la plateforme, préjudiciables à sa portance.

Les critères mécaniques de sélection d'une sous couche sont : la granularité, la dureté et la propreté. La ST 590B (SNCF, 1999) définit les spécifications requises pour le matériau de sous couches (Tableau 1). On citera en particulier le critère de "résistance" LA+MDE (Los Angeles Micro Deval en présence d'Eau) fixé à 40 pour les lignes

parcourues à plus de 160 km/h et à 50 pour les lignes de vitesse inférieure. Ces valeurs indiquent la qualité mécanique des matériaux utilisés dans les structures ferroviaires.

La couche de forme : elle a pour objectif de conférer à la plateforme une traficabilité compatible avec les besoins du chantier à court terme et d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques de l'arase. A long terme, la couche de forme permet de garantir le bon fonctionnement de la structure en service en assurant les rôles suivants : protection au gel, drainage des eaux zénithales infiltrées, répartition des contraintes sur le sol support.

Là aussi, c'est la ST 590B (SNCF, 1999) qui définit les spécifications requises pour le matériau de couche de forme (Tableau 1). Cette fois, le seuil admissible de "résistance" (LA+MDE) est fixé à 60.

Tableau 1 : Spécificités des granulats utilisés pour la réalisation de voie ferrée

Couches	Ballast	Sous – couche		Couche de forme
		V > 160 km/h	V < 160 km/h	
Résistance (LA + MDE)	≤ 20	≤ 40	≤ 50	≤ 60
Granularité (d/D)	31 <sup>5</sup> /63	0/31 <sup>5</sup>	0/31 <sup>5</sup>	0/125
Forme (A)	≤ 10	≤ 25		≤ 25
Vb <sub>g</sub>	/	≤ 1		≤ 2
Sensibilité au gel	Non gélifs	Non gélifs		Non gélifs

## 1.2.2 Les évolutions de la voie ferrée

Après 25 ans d'expérience de grande vitesse acquise sur de la voie ballastée, la direction l'Ingénierie de la SNCF a proposé à Réseau Ferré de France d'expérimenter une technique de pose de voie sans ballast (Figure 5) à l'occasion de la construction de la nouvelle ligne à grande vitesse LGV EST Européenne. Cette expérimentation a permis dans la phase de conception/réalisation, de définir les caractéristiques des structures porteuses (couche de forme et dalle), d'approfondir les interfaces voie/structure dalle (systèmes d'étanchéité, zones de transition) et de mettre au point une méthode de construction économique (couche de forme, dalle et voie).

L'expérimentation d'une voie sans ballast (VSB) a été réalisée sur le lot 12 de la LGV Est Européenne sur une longueur de 1 700 m. L'intérêt de la zone sélectionnée est qu'elle comportait sur un faible linéaire, une transition déblai/remblai, un passage sur un ouvrage d'art, sur un aiguillage et enfin une partie en virage.

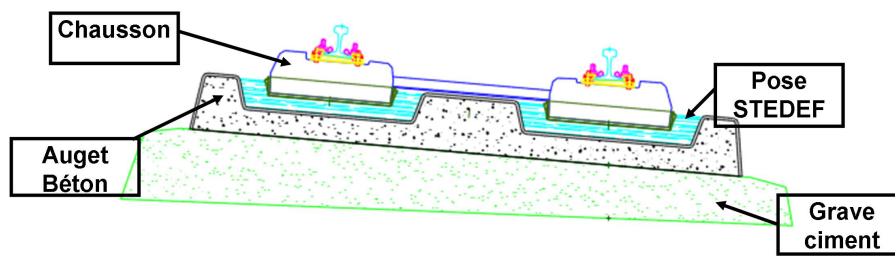


Figure 5: Coupe de la voie sur dalle

Pour limiter la fissuration, la dalle support en béton armé ( $350 \text{ kg ciment} / \text{m}^3$ ) comporte un ferrailage continu. L'épaisseur de la dalle support (15 cm) résulte plus des contraintes de gabarit pour respecter le profil en long prévu initialement pour une pose de voie ballastée.

La conception de la structure en grave ciment a également été guidée par l'objectif de portance imposé au niveau de la dalle de 120 MPa (critère de déformation verticale imposé : 0.2 mm sous une charge d'essieu de 170 kN). Une couche de forme d'une épaisseur de 50 cm a été mise en œuvre sur la zone avec un objectif de portance de 100 MPa.

Dans un premier temps, l'étude du grave ciment, située sous les augets béton, a consisté à dimensionner la structure tout en vérifiant la mise hors gel du sol support. Ensuite il a été nécessaire de définir les spécifications des matériaux mis en œuvre ainsi que la géométrie du grave ciment et ses tolérances de réglage car cette couche joue un rôle essentiel dans l'obtention du dévers de la voie ferrée. Enfin, l'analyse de la transition de raideur entre la voie ballastée et la voie sur dalle a été menée en concertation avec les départements Ouvrage d'Art et Etude Voie.

De ces calculs, il ressort qu'en zone courante, l'épaisseur du grave ciment doit être d'au moins 28 cm dans l'axe des rails. Un débord de 31 cm de part et d'autre de la dalle béton est prévu pour simplifier la mise en œuvre d'augets. La forme en grave ciment est posée sur la couche de forme pentée à 4 %. La pente transversale de la forme en grave ciment imposée lors du réglage de cette couche permet de donner le dévers à la voie (dévers de 0 à 153 mm).

### 1.3 Les systèmes de drainages ferroviaires

Le drainage des plateformes ferroviaires a un rôle stratégique pour la gestion, à court et long terme, de la voie ferrée.

En effet, la sécurité des trains, lors de leur circulation sur les rails est directement liée à la portance de la couche d'assise (sous couche et couche de forme) sur laquelle repose le ballast. La maîtrise des écoulements superficiels ou souterrain permet d'assurer un niveau de service requis en :

- Evitant l'inondation de la voie en canalisant les eaux de ruissellement
- Annihilant des défauts de portance du sol support et donc des défauts de géométrie de voie en collectant les eaux d'infiltration et de nappe

Il existe deux typologies principales de drainage (Figure 6):

Les Ouvrages Hydrauliques (non étudiés dans la thèse). Dimensionnés pour un temps de retour de 100ans, ils permettent le rétablissement des écoulements transversalement à la voie ferrée. Ils permettent ainsi la continuité des talwegs ou cours d'eau permanents. Ils sont constitués par des : buses, dalots ou ouvrages d'art.

Le drainage longitudinal : d'une occurrence de dimensionnement décennal et placé parallèlement à la voie ferrée, il permet la collecte des eaux de surface ruisselantes sur l'impluvium ferroviaire, les bassins versants naturels, mais aussi des eaux infiltrées dans la plateforme. Ils peuvent être soit : enterrés ou à ciel ouvert.

On distingue deux types de drainage longitudinal :

Le drainage profond (Collecteur drainant -CD- et Fossé béton préfabriqué à barbacanes -FBPB-) : il draine les eaux du bassin versant, de l'impluvium ferroviaire et de la plateforme mais également, lorsque le terrain naturel contient une nappe dont le toit est situé au plus à deux mètres sous la base du ballast, les eaux du sol support. L'implantation de ce dispositif doit permettre de maintenir le niveau des plus hautes eaux de la nappe à 1.50m de la base du ballast. L'objectif étant de laisser les structures d'assise hors eau et d'éviter la remontée des eaux par capillarité et sous l'effet de pumping engendré par les circulations. Ces remontées d'eaux chargées en fines occasionneraient des remontées boueuses dans le ballast en moffinant les caractéristiques mécaniques.





Figure 6: Drainages ferroviaires (longitudinaux et transversaux)

Le drainage de surface (Fossé Terre -FT- ou Revêtu -FTR-) : il permet le drainage des eaux de ruissellement et d'infiltration dans les structures rapportées afin de les garder hors d'eau et d'éviter une dégradation de la structure d'assise.

### 1.3.1 Répartition des différents dispositifs de drainage longitudinaux sur LGV

L'exploitation des archives et expertises internes de SNCF Réseau donne pour l'ensemble des linéaires de LGV (LN1 à LN 6, dans Tableau 2) 3536 km de drainage (SNCF, 2013).

Ces chiffres (Tableau 2) sont issus de la somme des doubles sens de voies, on obtient la répartition exhaustive suivante :

- pour l'ensemble des 3536 km voies : 1391 km de déblais dont 52.8% sont drainés par des fossés (734 km), 39.3% par des CD (547 km) et 7.9% par des FBPB (110 km) ;
- 19% (657 km) du linéaire total est équipé de drainage profond (CD et FBPB) ;

La Figure 7 indique la répartition des dispositifs drainage (CD/FBPB/Fossé) de chaque ligne pour l'ensemble de LN1 à LN6.

On voit une tendance pour les dernières LGV (LN 5 et LN 6), à la diminution de l'utilisation des CD au profit de fossé terre ou revêtu. Ce changement est principalement lié aux dysfonctionnements observés dans les CD et à la présence de tartre qui obstrue la capacité drainante du dispositif.

Tableau 2 : Résultats de l'étude préliminaire (2013) relative à l'évaluation du linéaire de CD/FBPB/Fossés sur LGV

données de doubles sens de voie du rassemblement de sondage infrapôle 2013 plus Expertise de Sarry 2005-2007 plus plan Autocad plus expertise ASS032 -2001

N° ligne	lignes incluses	linéaire voie en km	linéaire déblais en km	linéaire CD en km	linéaire FBPB en km	linéaire Fossé en km
LN1	Ligne 752 000 et 752300	812	397.597	209.899	20.688	167.01
LN2	Ligne total km:429000; 431000	546.6	233.2	78.069	3.582	151.549
LN3	Ligne total km:216000 ;226000 ; 216302;226306 ;226310	855.736	234.575	125.717	1.677	107.181
LN4	Ligne total km:752000 (pk 380-494)	227	88.6	82.581	3.294	2.725
LN5	Ligne total km:752000 ;834000; 834310;752356;752354	492.954	122.855	31.786	5.658	85.411
LN6	Ligne total km:005000 (pk 0-301,475)	602	314.466	18.727	75.232	220.507
somme LN1 - LN6 en km		3536.3	1391.3	546.8	110.1	734.4

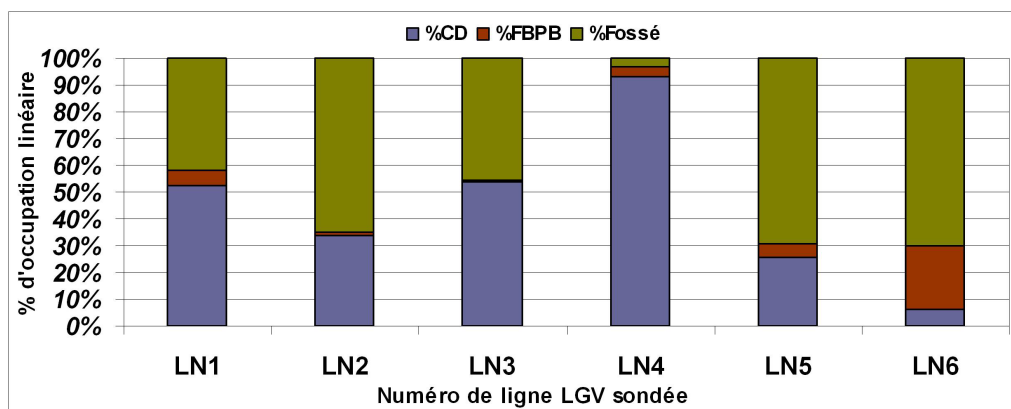


Figure 7: Répartition en pourcentage de linéaire des CD/ FBPB/Fossé en déblai sur LGV (LN1 à 6)

### 1.3.2 Généralités sur le dysfonctionnement des dispositifs de drainages profonds

Les dysfonctionnements des dispositifs de CD (drainages profonds), surviennent soit par défaut d'étanchéité, soit par réduction de leur section d'écoulement, soit par le colmatage des fentes. Ces causes peuvent être diverses :

- dégradation du CD : cassure de l'ouvrage ou des couvercles de caniveaux, désemboitement, décalage au niveau d'un joint créant des infiltrations ou une réduction de pente ;
- raccordement d'angle créant un obstacle ;
- obstruction par des éléments externes :
  - obstruction des fentes par des racines,

- obstruction de la section d'écoulement : par de la végétation (dans les FT essentiellement), par des objets, par des dépôts de matériaux divers : argiles, fines, ballast, et enfin dépôts carbonatés (gravitaires ou précipités).

Dans le cas d'un dysfonctionnement du drainage le long de la voie TGV (Train à grande vitesse), l'événement redouté est l'accumulation de l'eau dans la structure d'assise et/ou autour de la voie pouvant conduire à des défauts de voie liés à la réduction de la portance de la plateforme.

Lorsqu'un dysfonctionnement est constaté, la réparation ou la réactivation rapide du drain est alors indispensable.

Dans la suite de ce chapitre on s'intéressera uniquement au problème d'obstruction des ouvrages par entartrage.

## **1.4 Problématique d'entartrage des dispositifs des drainages profonds**

### **1.4.1 L'entartrage à l'origine du dysfonctionnement des drainages**

Suite à un sondage qualitatif auprès des établissements de maintenance (infrapôles) sur la LGV entre Paris et Tours/Le Mans (LN2), le retour d'expérience montre que sur 78 km (Tableau 3) de CD qui équipent cette ligne, 24 km présentent des pathologies. Parmi ces CD dysfonctionnant, 69% (16,5 km) présentent un colmatage soit liés aux fines du sol (1.7 km), soit aux dépôts carbonatés (14.8 km).

Ces chiffres sont donnés à titre indicatif, les mainteneurs ont répondu au questionnaire à partir de leur connaissance terrain et des passages caméra, la texture et la nature des matériaux n'ont pas été vérifiées de visu. Cependant ces chiffres nous montrent bien que la cause essentielle d'un dysfonctionnement (62% de cas : 14.8km/24km) est liée au colmatage par des dépôts de nature carbonatée.

Devant ce constat, il est important de définir l'entartrage afin de mieux comprendre la problématique. Il s'agit du terme communément utilisé par le milieu industriel pour décrire la formation de carbonate de calcium sur la surface interne d'un tuyau, particulièrement au niveau des points singuliers de celui-là. Cette concrétion peut se former à température ambiante (Ghobadinia et al., 2010; Legrand and Leroy, 1995), le dépôt est appelé tartre (« scale » en l'anglais) et forme un substrat à la surface occasionnant des pertes de charge aux écoulements.

Pour une eau de surface, au pH compris entre 6 et 8, la réaction chimique le plus souvent associée est la suivante :



Équation 1

Cette problématique est étudiée depuis plusieurs années à SNCF Réseau. Les études (Conso, 2013; Jia, 2012; Maraghni, 2011; Malhèrbe, 2001a; Courmarcel, 1998) , soulignent toutes, comme attendu, le rôle de l'environnement de la ligne dans la précipitation de carbonate de calcium dans l'eau. Cependant, la connaissance des mécanismes reste très générale, et les facteurs aggravants, parfois inconnus.

La Figure 8 présente les différents cas où le tartre impacte les ouvrages SNCF :

- Dans les CD longitudinaux : au niveau des fentes et des joints de raccordement de tronçon de CD tous les 7 m : i.e. site de Chauconin et Connerré (Conso, 2013; Jia, 2012; Maraghni, 2011; Malhèrbe, 2001b; Courmarcel, 1998 ) ;
- Dans les tunnels, sur les parois et dans les fossés de piédroits : i.e. tunnel de Marseille, Nantilly, Bréval, Caluire, La Motte, La Ramade (Rousse, 2015; Agaud and Faure, 2014; Jia, 2014);
- Dans les FBPB en drainage de déblai au niveau des barbacanes du côté du matériau drainant calcaire : i.e. cas de déblai Soignolles (PK 30 : site observé) illustré dans la Figure 8 ;
- Dans les descentes d'eau à la sortie des drainages : i.e. site de Chauconin et Soignolles (Jia, 2012);



**Figure 8: Concrétions calcaires constatées dans les drainages de LGV et en tunnel de ligne classique**  
**NB : Concrétions internes au collecteur drainant (CD) qui bouche les fentes et crée des micros barrages au fond du CD ; Concrétions dans une barbacane d'un fossé préfabriqué à barbacanes (FBPB) ; Concrétion dure à la sortie d'une buse de drainage le long de la voie qui crée des travertins et réduit la section mouillée du canal ; Concrétion accrochées et accumulées en draperies sur une paroi de tunnel (comme dans les milieux karstiques).**

Dans les ouvrages souterrains comme les gares : au niveau des égouttures au droit de fissures murales, dans les drains et les dispositifs de pompage dans le cas de nappe captive, infiltrations d'eaux dans les galeries techniques, dépôts dans les drains rainurés (ex : Gare de Lille Europe sur la ligne de **Fretin à Frethun** : PK 10,821 au PK 13,273).

#### 1.4.2 Etat de l'art de la problématique et ses conséquences pour SNCF Réseau

Parmi les diverses catégories de dispositifs de drainage, notamment longitudinaux, le CD est particulièrement utilisé sur LGV pour sa faible empreinte surfacique (limitation des emprises parcellaires) et sa capacité à drainer les eaux de surface et à rabattre les nappes.

##### 1.4.2.1 Linéaire de collecteurs drainants colmatés sur LGV (LN1 à 6)

Faisant suite au constat du colmatage des collecteurs drainants, une large campagne d'inspection par caméra vidéo a été entreprise à partir de 1994 à l'initiative des Infrapôles sur l'ensemble du réseau LGV en exploitation à cette date (Malhèbe, 2001a).

Néanmoins ce travail n'est pas exhaustif et les sites connus par l'Ingénierie pour sont ponctuels et leur connaissance est limitée au Bassin Parisien. Le Tableau 3 synthétise les résultats de l'étude préliminaire issue de ce Retour d'expérience (REX) et de l'exploitation des archives.

D'après ce REX, on estime que le linéaire total de CD sur l'ensemble des LGV de LN1 à LN6 est de 547 km de CD dont 25% sont colmatés.

Tableau 3 : Résultats de l'étude préliminaire (2013) relative à l'évaluation du linéaire de CD/FBPB colmaté sur LGV

données de doubles sens de voie du rassemblement de sondage infrapôle 2013 plus Expertise de Sarry 2005-2007 plus plan Autocad plus expertise ASS032 - 2002							
N° ligne	lignes incluses	linéaire CD en km	linéaire CD colmaté en km	% CD colmaté	linéaire FBPB en km	linéaire FBPB colmaté en km	% FBPB colmaté
LN1	Ligne 752 000 et 752300	209,899	81,079	38,6%	20,688	0,384	1,9%
LN2	Ligne total km:429000; 431000	78,069	24,112	30,9%	3,582	0	0,0%
LN3	Ligne total km:216000 ;226000 ; 216302;226306 ;226310	125,717	9,42	7,5%	1,677	0	0,0%
LN4	Ligne total km:752000 (pk 380-494)	82,581	20	17,5%	3,294	0	0,0%
LN5	Ligne total km:752000 ;834000; 834310;752356;752354	31,786			5,658	0	
LN6	Ligne total km:005000 (pk 0-301,475)	18,727	1,54	8,2%	75,232	0	0,0%
somme LN1 - LN6 en km		546,8	136,2	24,9%	110,1	0,4	0,4%

### 1.4.2.2 Techniques employées et coût de maintenance pour SNCF Réseau

Actuellement les solutions techniques employées par SNCF Réseau pour la maintenance des drainages entartrés sont essentiellement curatives. Il s'agit majoritairement d'inspections caméra couplées à des opérations d'hydrocurage. L'hydrocurage est une technique mécanique qui consiste à supprimer les obstructions de dépôts cumulés dans les canalisations par des jets d'eau à haute pression.

Ce travail (inspection + curage) est généralement délégué à une entreprise externe. 90% à 95% des fentes peuvent être réactivées par hydrocurage à très haute pression. Mais dans le cas de calcite dure, cette méthode peut dégrader la paroi interne du drain.

Du point de vue économique, cette technique est souvent peu rentable pour les cas de dépôt dur (durée pluri-hebdomadaire des chantiers) car les rendements sont faibles et la logistique associée est importante. Par exemple, le nettoyage d'un kilomètre de CD colmaté par des dépôts mous sur le site de Chauconin nécessite 4 personnes, pendant 4 nuits pour un coût de 20 k€. Dans le cas de concrétions dures, le chantier peut durer plusieurs semaines en interrompant la circulation des trains. Le coût unitaire est compris entre 7,5 et 67 k€/km (sur LN3 : Paris – Lille) en fonction de la complexité de l'intervention.

Le coût de maintenance annuel sur les différentes lignes LGV est fourni dans le Tableau 4. Il varie d'un facteur de moins de 10 000 à 80 000 euros par kilomètre par an. Il y a des millions d'euros dépensés chaque année sur LN 1, 2 et 3 pour le nettoyage des drains colmatés. Il est à noter que dans les tunnels, l'hydrocurage est la technique retenue pour nettoyer les fossés de piédroits.

Tableau 4: Fréquence et coût de l'hydrocurage des CD €/km/an

LGV	Année	Calcite moellon / dure	km à hydro curé	Fréquence	Prix €/km/an	Total €
Paris - Marseille	2011	molle	17	1 an	15K € (jour)	255 K €
	2012	dure	10	1 an	31K € (nuit)	310 K €
	2013	dure	6	1 an	26K € (nuit)	156K €
	2014	dure	5,5	1 an	26K € (nuit)	143K €
Paris – Tous/Le Mans	2005 à 2007	dure	24	1 an	35K €(nuit)	840K €
Paris - Lille	2012 à 2014	dure	3	6 mois à 2 ans	67K € (nuit)	201K €
	1999 à 2001	dure	6,42	2 ans	7,5K € (jour) à 45K €(nuit)	720K €
Paris - Strasbourg	2014	molle	1,5	8 ans	20K € (nuit)	30K €
Gare de Lille Europe	2010	dure	2,5	3 mois	80 K €	200K €
tunnel de Meyssiez	2016	dure	1,9	Pas d'infos	i.e.35K €(nuit)	67K €

En conclusion, cette méthode de l'hydrocurage devient de plus en plus coûteuse et son efficacité s'avère limitée dans le temps. Selon les sites et la vitesse de précipitation, la fréquence d'hydrocurage peut être annuelle à semestrielle (Tableau 4). Le phénomène semble impossible à stopper. D'après le retour d'expérience, sur la LGV Nord (déblai Ressons), les premières concrétions ont été observées 18 mois après la fin des travaux (curage tous les 2 ans), 1 an après le curage du CD sur la LGV Atlantique (déblai Connerré) et 6 mois après les travaux sur la LGV Est-européen (déblai Chauconin). De plus il faut environ 200 m<sup>3</sup>/km d'eau pour hydrocurer les drainages colmatés par des dépôts mous (i.e. cas de Chauconin). Dans les cas des dépôts durs, le volume de l'eau utilisée est largement supérieur.

#### 1.4.2.3 Etat de l'art des pistes d'optimisation étudiées à SNCF Réseau

Jusqu'en 2002, sur la base des études précédentes, la question du colmatage apparaît complexe, en particulier l'origine du colmatage qui reste inconnue et plusieurs phénomènes semblent interagir.

Diverses études menées au sein de SNCF Réseau avant ce travail de recherche se sont d'abord focalisées sur l'optimisation du fonctionnement du CD en espérant ralentir le phénomène d'entartrage voire favorisé « l'auto-curage » par le CD lui-même.

##### 1.4.2.3.1 Optimisation par la modification des dispositifs ou leur mise en œuvre

Les pistes d'optimisation des collecteurs drainants ont été étudiées dans le cadre de deux projets (Tableau 5): OPTIDR (Malhèrbe, 2001a, 2001b) et DrainAgeing (Mériaux et al., 2013).

OPTIDR visait à optimiser le fonctionnement des dispositifs de drainage profond dans les déblais. Diverses expérimentations sur la disposition, la géométrie du CD et la composition des matériaux ont été proposées dans le but de ralentir le colmatage causé par la précipitation de la calcite.

Tableau 5: Synthèse des projets de recherche conduits par SNCF Réseau avant 2013

Projet	Dispositif	Colmatage observé au	objectif	N°Rapport interne SNCF
<b>OPTIDR</b>	CD (PVC et FC)	Flancs & radiers	Maintenance	ASS032 ; ASS033
<b>DrainAgeing</b>	Tranche de l'infiltration	Géotextile & Fentes	Mécanisme	Articles publiés

Dans le but de mieux comprendre les phénomènes de colmatage des drains et des filtres, Irstea (L'Institut national de recherche en sciences et technologies pour



l'environnement et l'agriculture) et le LTHE (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement) ont mis en place le projet « DrainAgeing », auquel la SNCF a contribué. Un site expérimental de tranchées drainantes a été créé et suivi pendant une dizaine d'années à Roissard (Isère). Ce projet DrainAgeing visait à étudier le comportement hydraulique à long terme (10 ans) d'un géotextile positionné autour d'un collecteur dans une tranchée drainante. Une part du projet était dédiée à l'évaluation du risque de colmatage lié à la formation de calcite du drain posé dans des sols argileux en présence et en l'absence des géotextiles.

Le Tableau 6 rassemble l'ensemble des expérimentations menées dans le cadre des deux projets OPTIDR et DrainAgeing.

Tableau 6: sites ayant fait l'objet des tests dans le cadre des projets OPTIDR et DrainAgeing

Dispositif	Maintenance actuelle	cycle de curage	Projet	N° LGV/ Déblai	km de CD sous test
CD –fente en bas	Hydrocurage	2 ans	OPTIDR	226000 (PK75- 77) /Ressons	0,9
CD – Fente en bas	Hydrocurage	2 ans	OPTIDR	226000/ Wannehain	1,4
CD en béton	Hydrocurage + Inspection	1 an	OPTIDR	429000 (PK167-177)/ Conneré	3
CD – Fente élargie	Hydrocurage	2 ans	OPTIDR	752300(PK 30 -31)/ Inter –connexion / Servon	3,1
CD+ géotextile	Pas de curage, observation en fin d'expérimentation	DrainAgeing	Roissard (Isère)	hors voie ferré	

Ces projets ont permis d'identifier les pistes d'optimisation de conception du produit CD. Ces évolutions sont reprises ci-dessous :

a) Composition des produits

Lit de pose (OPTIDR) : Le berceau béton est un fournisseur naturel de carbonate. Dans le cadre de cette recherche, il a été proposé de substituer ce berceau béton par un lit de pose classique (sable). Sur un même site, une expérimentation a été réalisée sur un CD conçu sans berceau béton et sur un CD conçu avec berceau en béton. Dans les deux cas la concentration en sulfates (lixiviation du béton) dans l'eau a été comparée.

Les résultats d'analyse ont montré que la concentration en sulfates dans l'eau du CD sans berceau en béton est 1/3 inférieure à celle du collecteur qui est posé sur béton poreux. Il a été supposé que la participation du béton dans la fourniture de calcium dans l'eau.



En conclusion, il avait été proposé de procéder à la fouille d'au moins une tranchée drainante pour vérifier si le lit de pose en béton maigre était une source de concrétion calcaire à l'intérieur du collecteur, mais cela n'a pas été réalisé.

#### b) Nature du CD (OPTIDR)

Initialement le CD était réalisé en béton. La rugosité de ce matériau et sa composition chimique en faisait un facteur privilégié à l'apparition de concrétions calcaires. Afin de pallier ce problème ces ouvrages béton ont été remplacés par des matériaux thermoplastiques (PVC ou PEHD). Le changement de matériaux n'a pas supprimé l'apparition de tartre, cependant le CD thermoplastique a permis un nettoyage plus facile.

#### c) Disposition des dispositifs de drainage

Fentes en bas (OPTIDR) : Un essai ( Malhèrbe, 2001b; Courmarcel, 1998) sur les collecteurs eux même (positionner les fentes en bas de radier) a été effectué sur la LGV Nord (Paris –Lille), dans le déblai de Wannehain sur la branche Belge en 1996. C'est un déblai composé d'environ 3m de profondeur d'argiles grises. Lors des terrassements de 1996, il a été constaté une nappe sub-affleurant à l'arase.

Les collecteurs (en PVC et en Fibre-ciment (FC)) ont été disposés les fentes en bas pour qu'elles restent ennoyées en permanence, en supprimant le lit de pose en béton maigre. Ils ont été posés dans un sable fin propre de type 2/4 mm. Le matériau filtrant au-dessus du collecteur est le matériau argileux. Un géotextile a été mis en place afin de séparer le collecteur du sable, et la masse drainante du sol support, (Malhèrbe, 2001a, 2001b). Malheureusement, les résultats montrent peu de différence au niveau des fentes colmatées par l'entartrage entre le CD avec fente en bas et le CD usuel. Il est apparu qu'il est intéressant de mettre en œuvre un collecteur à fente en bas dans un déblai humide où la concrétion calcaire est bien connue.

Par contre, les fentes en bas ont été constatées plus sensibles au colmatage lié aux fines s'il n'y a pas un débit permanent. Par exemple, dans le déblai de Resson (LGV Nord), malgré un écoulement permanent, des fines mobilisées sont sédimentées et accumulées autour des fentes positionnées en bas (Malhèrbe, 2001a, 2001b). Ces fines sont supposées jouer un rôle de « noyaux » de la croissance de la calcite. L'observation du terrain indique que la concrétion calcaire se développe très rapidement et nécessite un curage tous les deux ans.

#### d) Géométrie des dispositifs

Elargissement des fentes (DrainAgeing) : En 1994, dans le même déblai de Servon sur l'interconnexion de la LGV Nord (LN3) et Sud (LN1) où les tests de CD avec fentes en bas sont réalisés, une comparaison du CD en fibre – ciment de fentes classiques de 2 mm, et

du CD en fibre –ciment de fentes élargies à 8 mm est aussi effectuée en pied de déblai (Courmarcel, 1998). Les dépôts calcaires se sont formés également dans les deux collecteurs testés, sans qu'il soit possible d'identifier de différence au niveau du colmatage des fentes.

Cependant, d'après les tests, la solution d'augmenter le nombre de fentes par mètre et d'élargir la fente à 20 mm ont été proposées dans le but de ralentir le colmatage total au niveau d'entrée d'eau du CD et de diminuer l'effet de « dépressurisation » afin d'optimiser le cycle de la maintenance.

#### **1.4.2.3.2 Dispositifs alternatifs envisageables**

En dehors de l'optimisation du CD lui-même, SNCF Réseau cherche aussi à développer des nouveaux dispositifs pour remplacer le collecteur drainant.

Le FBPB (fossé béton préfabriqué à barbacanes) testé en premier est apparu comme l'un des dispositifs alternatifs possibles. Le fait d'utiliser des barbacanes latérales d'un diamètre de 80 mm, situées soit à 15 ou 25 cm du fil d'eau, semble réduire le phénomène d'entartrage au regard des fentes de 2 mm. Néanmoins un cas d'apparition de tartre au niveau des barbacanes a été observé dans le déblai de Soignolles (PK 30 à 31) sur la ligne de l'interconnexion Nord. Après un an de mise en parallèle d'un FBPB avec le CD in situ, des dépôts carbonatés ont aussi été constatés autour de ses barbacanes, mais en quantité beaucoup plus faible que les dépôts observés après un an d'exploitation du CD sur le même site de Soignolles.

Le FTRB (fossé terre revêtu à barbacanes) a été beaucoup employé sur LGV depuis 2005. Il s'est montré efficace vis-à-vis de l'entartrage. Par contre, à profondeur équivalente d'un CD, pour un rabattement de nappe (> 1,5 m) il nécessite une emprise plus importante, il nécessite beaucoup plus de terrassement et donc un surcoût du projet. Il ne peut pas s'adapter au cas des gares, en entre-voies ou même dans certains tunnels, surtout dans les endroits où l'espace est très limité.

C'est pourquoi, la recherche de dispositifs optimaux vis-à-vis de l'entartrage, du coût de réalisation et de maintenance, est toujours en cours au sein de la Direction technique de l'ingénierie de SNCF Réseau.

## **1.5 Conclusion**

Après cette première présentation des travaux menés sur le colmatage dans les dispositifs de drainage de l'infrastructure ferroviaire, il apparaît que ce dernier est lié au

phénomène d'entartrage avec deux grandes conséquences industrielles : nuisance de la tenue de voie à moyen/long terme et surcoût de maintenance. SNCF Réseau a considéré qu'un le travail de thèse était nécessaire pour répondre aux questions relatives à la connaissance des causes et du processus de formation du tartre.

## Chapitre2 Bibliographie

### 2.1 Généralités et équilibre du système calco-carbonique

#### 2.1.1 Eléments majeurs et mineurs dans l'eau de la nature

Les éléments majeurs dans l'eau dans la nature comprennent (Michard, 2002; Legrand and Leroy, 1995):

- les principaux gaz atmosphériques dissous ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2CO_3$ ) ;
- les ions résultant de la dissolution des composés minéraux, susceptibles de peser dans la balance ionique ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  ;  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ) ;
- les ions résultant de la dissociation de l'eau ( $H_3O^+$ ,  $OH^-$ ).

La concentration des mineurs dépasse rarement quelques milligrammes par litre (mg/l) dans l'eau de la nature (hors pollution). Les mineurs courants sont : :

- les particules argileuses en suspension colloïdale ;
- des composés organiques comme les acides humiques ;
- les bactéries ;
- les algues ;
- $NH_4^+$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  ;

En chimie analytique, la balance ionique (BI : la neutralité électronique) des ions majeurs analysés doit être inférieure à 5% (Michard, 2002):

$$BI \% = 200 * (\sum_{\text{cations}} - \sum_{\text{anions}}) / (\sum_{\text{cations}} + \sum_{\text{anions}}) \quad \text{équ. 1}$$

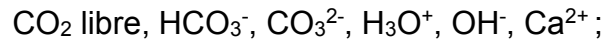
$$\sum_{\text{cations}} = 2 * [Ca^{2+}] + 2 * [Mg^{2+}] + [K^+] + [Na^+] + \dots \quad \text{équ. 2}$$

$$\sum_{\text{anions}} = 2 * [CO_3^{2-}] + 2 * [SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [HCO_3^-] + \dots \quad \text{équ. 3}$$

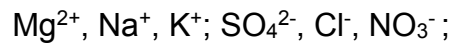
NB: pour ions i, [i] est la concentration

## 2.1.2 Equilibres calco-carboniques

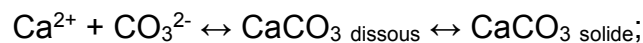
Dans le système calco-carbonique, les éléments fondamentaux sont les éléments suivants :



Les éléments caractéristiques sont les ions suivants :



L'équilibre calco-carbonique peut être représenté par la réaction suivante :



Les éléments caractéristiques n'apparaissent pas dans des équilibres du système calco-carbonique, mais ils influent sur les constantes sous la forme de la force ionique (I).

$$I = 1/2 * \sum C_i * Z_i^2 \quad \text{équ. 4}$$

NB: pour ion i,  $C_i$  est sa concentration ;  $Z_i$  est la valence

L'activité d'une espèce est égale au produit du coefficient de l'activité ( $\gamma_i$ ) par la concentration.

$$(i) = \gamma_i * [i] \quad \text{équ. 5}$$

NB: pour ions i,  $[i]$  est la concentration ; (i) est l'activité

Le coefficient  $\gamma_i$  est calculé par l'Équation de Debye-Hückel (Michard, 2002):

$$\log(\gamma_i) = (-A * Z_i^2 * I^{1/2}) / (1 + I^{1/2}) \quad \text{équ. 6}$$

NB: pour ions i,  $Z_i$  est la valence ; I est la force ionique (vu l'équation équ. 4) ; A = coefficient de Debye – Hückel (0,5)

### a) Constantes d'équilibres des réactions élémentaires

Pour la réaction élémentaire comme  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ , la vitesse de réaction est définie par la concentration ( $[i]$ ) des ions i au lieu de l'activité ((i)) des ions. Par contre,

une réaction globale peut être dissociée en réactions élémentaires, en série ou en parallèle. La vitesse globale de la dissolution-précipitation de la calcite peut être limitée par une ou plusieurs réactions élémentaires. Par exemple, la vitesse globale pour la réaction  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ , peut être limitée par une des réactions élémentaires listés dans le Tableau 7.

Tableau 7: équilibres du système de calco-carboniques

Equilibres	N°	Constantes d'équilibres ( $K_i$ )	$K_i'$ (25°C)
<b>Interphases (gaz ↔ liquide)</b>			
$\text{CO}_2 (\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2 (\text{aq})_{\text{libre}}$	Eq. 1	$K_H = 1/\alpha = P_{\text{CO}_2}(\text{g})/[\text{CO}_2 (\text{aq})_{\text{libre}}]$ $K_H = 1/\alpha = P_{\text{CO}_2} (\text{g})/(\text{CO}_2 (\text{aq})_{\text{libre}})$	$6,835 \cdot 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{l})$
<b>Interne phase liquide</b>			
$\text{CO}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$	Eq. 2	$K_0 = [\text{H}_2\text{CO}_3]/[\text{CO}_2 (\text{aq})]$ $K_0 = (\text{H}_2\text{CO}_3)/(\text{CO}_2 (\text{aq}))$	$10^{-1.47}$
$\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	Eq. 3	$K_1' = [\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]/[\text{H}_2\text{CO}_3]$ ; mol/l $K_1 = (\text{H}^+)(\text{HCO}_3^-)/(\text{H}_2\text{CO}_3)$	$10^{-6.35}$
$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	Eq. 4	$K_2' = [\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$ ; mol/l $K_2 = (\text{H}^+)(\text{CO}_3^{2-})/(\text{HCO}_3^-)$	$10^{-10.33}$
$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	Eq. 5	$K_e' = [\text{H}^+][\text{OH}^-]$ ; mol/l $K_e = (\text{H}^+)(\text{OH}^-)$	$10^{-14}$
<b>Interphases (liquide ↔ solide)</b>			
$\text{CaCO}_3 (\text{s}) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	Eq. 6	$K_s = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$ $K_s = (\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})$	$10^{-8.34} (\text{mol}^2 \cdot \text{kg}^{-2})$
NB : pour une espèce i, [i] est la concentration ; (i) est l'activité ; données de $K_i'$ sont pris dans livre (Michard, 2002) sauf le $K_1'$ une étude récente qui indique sa valeur égale $10^{-(3.45 \pm 0.15)}$ ; $P_{\text{CO}_2}$ est la pression partielle du $\text{CO}_2$ dans l'air.			

$K_i'$  : Constantes des réactions à l'équilibre calculées avec les concentrations des espèces. La constante a une valeur maximale quand on néglige l'impact de la force ionique des autres ions dans la solution.

$K_i$  : Les constantes des réactions à l'équilibre qui sont calculées avec les activités des espèces. Ces constantes ont une valeur ajustée sous l'effet de la force ionique des autres ions dans la solution.

L'équilibre du système calco-carbonique est réparti entre 3 phases : gaz, liquide et solide :

- L'équilibre du  $\text{CO}_2$  entre l'air et l'eau est régi par la loi de HENRY (Eq. 1 dans Tableau 7). La constante  $K_H$  est fortement dépendante de la température ( $T^\circ\text{C}$ ), et peu de la force ionique.
- Les constantes d'association  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_e$ , le produit de solubilité  $K_s$  et le  $K_0$  sont dépendants de la température de l'eau et de la force ionique qui est un indicateur de la somme des ions majeurs.

- Les valeurs des constantes  $K_H$ ,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_e$  et celle de  $K_s$  à 25°C sont listées dans le Tableau 7. Les valeurs dépendant de la température sont données par la relation de van't Hoff (Michard, 2002):

$$\ln K_{(T)} = \ln K_{(25^\circ\text{C})} + 298,15 / ((273,15+T) + \Delta rS^\circ / R * ((T-25) / (T+273,15))) \quad \text{éq. 7}$$

NB: T : température en °C ;  $\Delta rS^\circ$  : l'écart de l'entropie entre les produits et les réactants (J/(K.mol)) ; R : le constant de gaz parfait est 8,314 J/(K.mol)

## b) Indicateurs thermodynamiques du système calco-carbonique

Le degré de saturation ( $\Omega$ ) de la calcite est le plus utilisé dans le domaine de la chimie de l'eau. Il est égal au rapport du produit ionique divisé par le produit de solubilité ( $K_s' = 10^{-8.34} \text{ mol}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$  à 25°C) :

$$\Omega = (\text{CO}_3^{2-}) * (\text{Ca}^{2+}) / K_s' \quad \text{éq. 8}$$

NB:  $(\text{CO}_3^{2-})$  et  $(\text{Ca}^{2+})$  est l'activité de la carbonate et du calcium ;  $K_s' = 10^{-8.34} \text{ mol}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$  à 25°C ;  $\Omega < 1$  : calcite dissout ;  $\Omega = 1$  : équilibre ;  $\Omega > 1$  : calcite précipite

Dans le cas où  $\Omega$  est inférieur à 1, l'eau est sous saturée et il y a donc dissolution spontanée de la calcite jusqu'à ce que le produit des activités ioniques dans la solution soit égale à  $K_s'$ .

Si, au contraire,  $\Omega$  est supérieur à 1, l'eau est dite sursaturée au regard du  $\text{CaCO}_3$  et une précipitation spontanée de la calcite est thermodynamiquement possible.

Lorsque  $\Omega = 1$  la réaction de dissolution – précipitation de la calcite a atteint l'équilibre.

Dans le domaine de la chimie aquatique et de la géochimie, la notion d'indice de saturation (I.S.) est aussi couramment utilisée ( Ruiz-Agudo et al., 2011a; Dietzel et al., 2008; Vavouraki et al., 2008; Liu et al., 1995):

$$\text{I.S.} = \log \Omega \quad \text{éq. 9}$$

NB: I.S. < 0 : calcite dissout ; I.S. = 0 : équilibre ; I.S. > 0 : calcite précipite

Peu importe que l'on utilise  $\Omega$  ou I.S., il faut toujours les estimer à partir d'une analyse de l'eau. Donc, il existe sept inconnues : la température (T°C) de l'eau, la  $P_{\text{CO}_2}$  (pression partielle du  $\text{CO}_2$  dans l'air),  $\text{CO}_2$  (aq) ;  $[\text{H}^+]$ ,  $[\text{HCO}_3^-]$ ,  $[\text{CO}_3^{2-}]$ ,  $[\text{Ca}^{2+}]$  (Figure 9).

Par contre, dans le domaine industriel (Vazirian et al., 2016; Ghobadinia et al., 2010; Hammer et al., 2008; Kroening et al., 1996; Legrand and Leroy, 1995), surtout dans les réseaux de distribution d'eau, d'assainissement, piscine, chaudière, pétrole, forage et agricole, les notions d'indice de Langelier (I.S.L) ou Ryznar (I.S.R) (Shankar, 2014) sont souvent utilisées.

Dans certains cas les applications sont simplifiées (par exemple le risque corrosif-incrustant basé sur un ensemble de paramètres minimalisés (température, pH, la dureté et l'alcalinité) de l'eau concernée.

$$\text{I.S.L} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad \text{équ. 10}$$

$$\text{I.S.R} = 2\text{pH}_s - \text{pH} \quad \text{équ. 11}$$

$$\text{pH}_s = (\text{pK}_2' - \text{pK}_s') + \text{pCa} + \text{pAlc} \quad \text{équ. 12}$$

$$\text{pK}_2' = -\log(K_2) ; \text{pK}_s' = -\log(K_s') \quad \text{équ. 13}$$

$$\text{pCa} = -\log([\text{Ca}]) ; [\text{Ca}] - \text{concentration de calcium en mol/l} \quad \text{équ. 14}$$

$$\begin{aligned} \text{pAlc} = -\log([\text{Alc}]) ; [\text{Alc}] - \text{concentration de l'alcalinité en mol/l} ; \\ [\text{Alc}] = 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] \end{aligned} \quad \text{équ. 15}$$

NB: I.S.L < 0 : corrosive ; I.S.L = 0 : neutre ; I.S.L > 0 : incrustante ;  
I.S.R < 6 : incrustante ; I.S.R > 7 : corrosive ; 6 < I.S.R < 7 : peu corrosive ou incrustante

### c) Système calco-carbonique – ouvert et fermé

Suivant qu'il soit en contact ou non avec les sources de carbonates et de calcium externes, le système interphasique peut être caractérisé comme un système ouvert ou fermé (Figure 9).

Dans le système fermé aux réactifs externes, la concentration de calcium totale  $[\text{Ca}]_t$  et celle de carbone totale  $[\text{C}]_t$  sont constantes. Le système arrive à l'équilibre quand  $\Omega=1$ . La température ( $T^\circ\text{C}$ ) est la seule variable qui peut déplacer l'équilibre sans modifier  $[\text{Ca}]_t$  et  $[\text{C}]_t$ .

Le pH et la conductivité ( $\sigma$  : charges électroniques d'ensemble des ions) sont alors considérés comme des variables d'état qui illustrent la répartition des espèces dans l'eau (Figure 10).



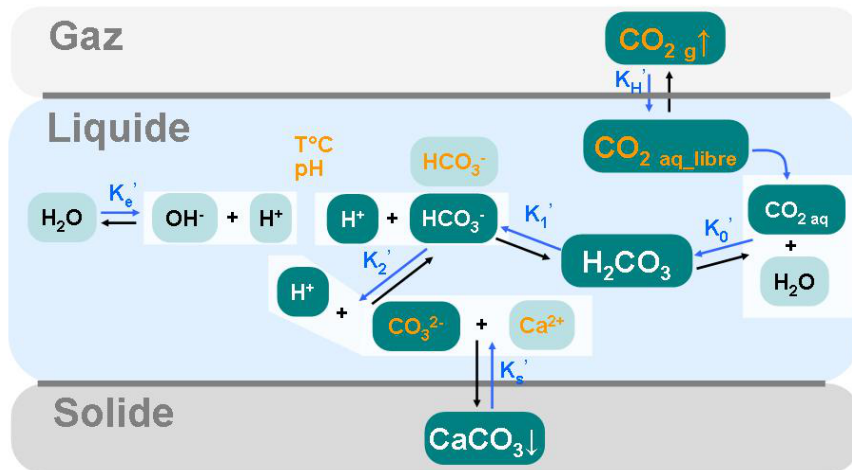


Figure 9 : Système calco – carbonique et ses paramètres

Dans un système fermé, la concentration de  $[\text{HCO}_3^-]$  est dominante entre le pH 6,35 ( $\text{p}K_1$ ) et le pH 10,33 ( $\text{p}K_2$ ). Le pH d'équilibre est dépendant de la température, de la  $P_{\text{CO}_2}$  initiale, du pH initial, de la concentration des particules de  $\text{CaCO}_3$  initiale dans l'eau. Par contre, dans un système ouvert à  $P_{\text{CO}_2}$  atmosphérique et avec la présence de calcite à 25°C, le pH à l'équilibre est toujours 8,3 (Figure 11).

$$[\text{Ca}]_t = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{CaCO}_3]; \quad \text{équ. 16}$$

$$[\text{C}]_t = [\text{CO}_2 \text{ g}] + [\text{CO}_2 \text{ aq libre}] + [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{CaCO}_3] \quad \text{équ. 17}$$

Pour le système fermé, si  $\Omega$  initial est supérieur à 1, la calcite se forme. Pour le cas où un dégazage de  $\text{CO}_2$  apparait, le  $\sigma$  chute ( $\downarrow$ ), mais le pH peut rester constant ( $\rightarrow$ ), chuter ( $\downarrow$ ) ou augmenter ( $\uparrow$ ) sous un double effet de la sursaturation de la calcite et du dégazage du  $\text{CO}_2$ . Par contre, pour le cas de la formation de la calcite sans dégazage de  $\text{CO}_2$ , le pH chute, mais le  $\sigma$  peut varier ( $\rightarrow \downarrow \uparrow$ ) selon l'écart à la saturation  $\Omega$  et la sursaturation en  $\text{CO}_2$ .

Dans le système ouvert aux réactifs externes, par exemple ouvert aux calcaires du milieu, ou à  $\text{CO}_2$  atmosphérique,  $[\text{Ca}]_t$  et  $[\text{C}]_t$  sont variables mais la  $P_{\text{CO}_2 \text{ atm}}$  reste constante .

Par contre, si la consommation des réactifs est inférieure aux arrivées, pH et  $\sigma$  vont rester constants ( $\rightarrow$ ) ou légèrement chuter ( $\downarrow$ ), le dégazage de  $\text{CO}_2$  se produit en général, sauf dans le cas où il y a une source extérieure d'  $[\text{OH}^-]$ .

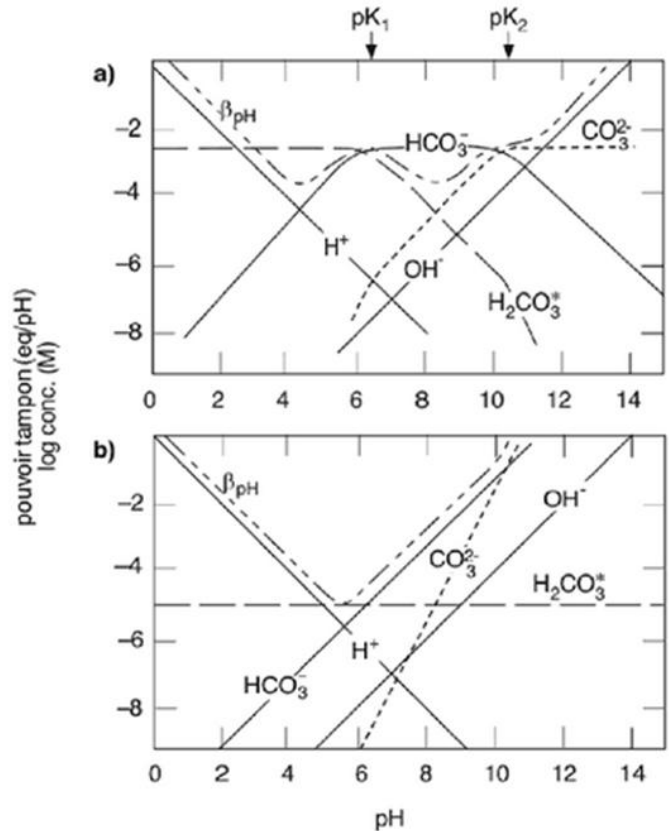


Figure 10 : Pouvoir tampon ( $\beta_{pH}$ ) des systèmes carbonatés –diagramme de Sillén à 25°C

NB : a) système fermé ; b) système ouvert ;  $\beta_{pH}$  : proportionnel à la somme de la concentration des espèces ; graphique extrait du livre (Sigg et al., 2014)

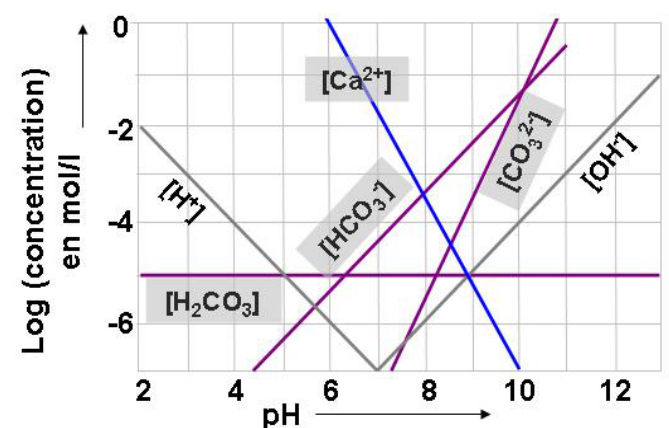


Figure 11 : diagramme de Sillén à 25°C – système ouvert à  $P_{CO_2\ atm}$  et présence de calcite

## 2.2 Cinétique de dissolution – précipitation de la calcite

### 2.2.1 Notions de base

La dissolution de calcite est un processus physico-chimique par lequel le soluté (ex :  $\text{CaCO}_3$  dissout en molécule) est dissous dans un solvant (ex : l'eau) afin de former une solution mélangée homogène de la molécule de  $\text{CaCO}_3$  et les espèces dissociées ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  dans Figure 12 a).

Plusieurs étapes élémentaires décrivent le processus de la formation de la calcite (Figure 12 b et c): d'abord, la mise en place de la sursaturation des ions nécessaires à la précipitation d'une phase solide dans la solution, puis la nucléation - germination qui conduisent à la précipitation, puis à l'agrégation (Figure 12 c).

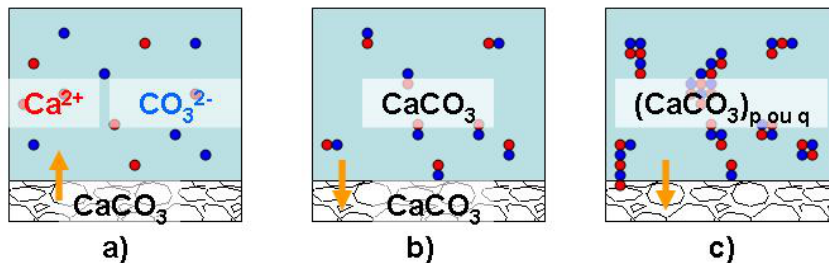


Figure 12 : Dissolution – précipitation – cristallisation de la calcite

NB : a) La dissolution ; b) la précipitation ; c) la cristallisation ;  $(\text{CaCO}_3)_p$  : molécule plus complexe ;  $(\text{CaCO}_3)_q$  : molécule moins complexe

#### a) Solution sursaturée ( $\Omega > 1$ )

Une solution sursaturée ( $\Omega > 1$ ) de la calcite peut être obtenue soit par refroidissement ou évaporation (éclair ou pas) de la solution, soit par ajout des réactifs ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  ou  $\text{HCO}_3^-$ ) provenant de la dissolution d'autres minéraux contenant du calcium, le gypse par exemple (Giulietti et al., 2001).

#### b) Germination – Nucléation

Dans une solution sursaturée, les solutés ont une tendance à se réorganiser pour former la phase solide, dite « germination ». La germination est dépendante de l'énergie, par exemple, l'augmentation de la température de l'eau va favoriser la germination. Puis, une interface solide – liquide se forme.

Une fois, la barrière de l'énergie d'activation dépassée : 39 ~ 155 kJ/mol dans la littérature selon les expérimentations (Brečević and Kralj, 2007; Ogino et al., 1990; Wiechers et al., 1975; Nancollas and Reddy, 1971)), la « nucléation » homogène (quelques molécule ou ions se réunissent pour former des amas des germes) se produit.

Par contre, dans le cas pratique, cette nucléation se produit souvent plus facilement en présence de particules étrangères qui agissent comme les germes, ou à cause de la mise en contact de la solution avec une surface solide (par exemple, les parois de conduits) qui crée une interface solide – liquide pour la nucléation. Ce type de nucléation est dit « hétérogène », et l'énergie effective d'activation est souvent plus basse que celle de la nucléation homogène.

Les germes de calcite formés pendant la nucléation sont souvent à l'échelle du nanomètre : une dizaine jusqu'à 500 nm (Brečević and Kralj, 2007; Giulietti et al., 2001). Le temps d'apparition des germes dans l'eau est appelé « temps d'induction ». La vitesse de la nucléation est largement dépendante de l'énergie du système et du degré de saturation de la calcite.

### c) Précipitation

L'apparition d'une phase solide dans une solution liquide est connue comme le processus de « précipitation » (Pu et al., 2016; Rossi and Lozano, 2016; Wan et al., 2016; Brečević and Kralj, 2007).

La distribution spatiale des réactifs et des particules dans un réacteur est importante, donc, la dynamique du fluide est un facteur essentiel de la précipitation. La vitesse de précipitation est proportionnelle au degré de saturation ( $\Omega$ ) d'une solution. Elle se produit dans le cas d'un  $\Omega$  assez élevé ( $\Omega > 10$ ).

Ce processus de précipitation de la calcite devient spontané quand le  $\Omega$  d'un système calco-carbonique, est supérieur à 40 (Legrand and Leroy, 1995). Les particules de calcite se forment à l'échelle de micromètre dans l'eau.

### d) Cristallisation

La cristallisation d'une solution peut se produire lorsque le degré de saturation est faible (typiquement inférieur à 10) (Giulietti et al., 2001). Les germes formés pendant la nucléation continuent à s'agrandir en s'agglomérant afin de former des cristallites.

En théorie, la cristallisation se termine au moment où  $\Omega$  devient égale à 1. Mais, en pratique, elle s'arrête quand les cristallites atteignent une certaine taille (millimètres) qui engendre leur sédimentation (Brečević and Kralj, 2007). La pression de  $\text{CO}_2$  ( $P_{\text{CO}_2}$ ) dans l'eau augmente suite à la cristallisation de la calcite, puis un dégazage de  $\text{CO}_2$  apparaît.

La forme extérieure du cristal est déterminée par le faciès (le développement relatif des faces entre elles) car l'accroissement des cristallites ne se produit que sur les faces

dont la cinétique d'accroissement est la plus lente (Teghidet, 2012; Brečević and Kralj, 2007).

e) Cinétique de dissolution/précipitation de calcite dans l'eau

Les données cinétiques (la vitesse) de la dissolution et de la précipitation ont été initialement publiées en 1950 (Erga et al., 1956). La méthode expérimentale pour estimer la cinétique, développée en 1970 (Berner and Morse, 1974) consiste à ajouter des particules fines de calcite dans l'eau de mer sous agitation.

Le modèle mécanistique de Plummer décrit que la vitesse de la dissolution de la calcite est dépendante des conditions hydrodynamiques dans le réacteur ainsi que de la vitesse des réactions hétérogènes sur la surface de la calcite.

Ces auteurs ont mené des expérimentations pour définir l'équation de la cinétique de la dissolution – précipitation de calcite dans un réacteur fermé en présence de la calcite sous différentes conditions. Trois variables ont été prises en compte : la vitesse d'agitation, la  $P_{CO_2}$  (0,0003 ~ 0,97 atm) et la température (5 ~ 60°C).

Plus tard, un modèle de transfert de masse plus complet que les précédents, nommé modèle DBL (diffusion boundary layer – couche limite de la diffusion) a été développé (Dreybrodt and Buhmann, 1991). Il prend en compte les hypothèses suivantes:

- la diffusion de la molécule traversant une couche limite de l'épaisseur  $\varepsilon$  proche de l'interface de solide – liquide ;
- la conversion lente de  $CO_{2\text{aq}}$  en  $HCO_3^-$  et  $H^+$  ;
- les réactions chimiques apparues sur la surface de calcite comme Plummer l'a indiqué .

Ces modèles ont été beaucoup développés en géochimie depuis 1980, surtout dans les systèmes comportant une interface entre minéraux et fluides ( Stillings and Poulson, 2010; Aagaard and Helgeson, 1982; Lasaga, 1981).

Enfin la notion de « spéciation surfacique » a été ajouté aux modèles précédents. Dans cette couche limite proche de la surface du minéral, plusieurs espèces coexistent en plus de  $CaCO_3$  moléculaire et des ions  $Ca^{2+}$  et  $HCO_3^-/CO_3^{2-}$  par exemple :  $CaHCO_3^+$ ,  $CaOH^+$  etc. Chaque espèce peut avoir un coefficient de diffusion et une constante cinétique différents, et ainsi influencer sur le résultat de l'estimation par rapport à celles mesurées.

Toutes ces études nous permettent de mieux comprendre les mécanismes de la cinétique et des divers facteurs de contrôle .

Les extensions de ces modèles originaux nous fournissent une relation directe entre la cinétique de dissolution/précipitation (représenté par la vitesse globale « R ») et les conditions thermodynamiques (représentées par  $\Delta G$  : la variation de l'énergie libre de Gibbs) (Xu et al., 2012; Arvidson and Lutge, 2010; Ogino et al., 1990).

Cette relation non linéaire de R-  $\Delta G$  n'est pas adaptée à toutes les valeurs du degré de saturation ( $\Omega$ ) de l'eau (Hellmann and Tisserand, 2006; Oelkers, 2001; Burch et al., 1993). Il est applicable pour les cas extrêmes soit proches de l'équilibre, soit beaucoup loin de l'équilibre (Xu et al., 2012). Pour les cas intermédiaires, la cinétique de la dissolution ou précipitation est souvent sur estimée par ces modèles (Xu et al., 2012; Liu et al., 1995).

Dans les études actuelles, les équations mathématiques incorporant les données cinétiques et thermodynamiques obtenues par l'expérimentation sont présentées sous différentes formes et sont synthétisées dans le paragraphe suivant.

## 2.2.2 Equations de la cinétique de dissolution – précipitation de calcite

Les modèles et équations utilisés dans le cadre d'étude de la cinétique totale ( $R_{\text{totale}}$  : somme de dissolution/précipitation) dans une eau naturelle à température normale sont résumés dans le Tableau 9. Mais, il n'y a pas un seul modèle qui soit suffisamment complet, ils s'appliquent dans des cas spécifiques.

Par exemple, dans le modèle mécanistique de Plummer , la thermodynamique de la solution et les spéciations surfaciques de la calcite doivent être prises en compte (équ.20). Ce modèle s'applique moins bien pour les cas proches de l'équilibre en raison d'une augmentation de l'incertitude liée à l'estimation de  $\Omega$  et pH. Si  $P_{\text{CO}_2}$  est inférieure 0,03atm, alors l'hypothèse est faite que  $P_{\text{CO}_2}$  dans la couche limite est égale à celle dans l'eau, ce qui peut engendrer une surestimation de la  $R_{\text{totale}}$  entre deux (si le temps de réaction ( $t_{\text{réac}} \leq 40$  min) et une vingtaine de fois (si  $t_{\text{réac}} > 40$  min) plus grande que celle observée . ( $R_{\text{totale}} < 100 \text{ mg/cm}^2/\text{an} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ mmol/cm}^2/\text{s}$ )

Tableau 8 : Relation de  $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{éq}}$  et  $P_{\text{CO}_2}$  à 20 °C

$P_{\text{CO}_2}$ atm	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-1}$	1
$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{éq}}$ (mol/l)	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$3,23 \cdot 10^{-3}$	$4,17 \cdot 10^{-3}$	$9,84 \cdot 10^{-3}$
(Dreybrodt, 1988)						

L'écart entre prédiction de vitesse de précipitation et celle mesurée in situ peut être dû à l'incertitude de la mesure du pH (Kadis and Leito, 2010; Kadis, 2002; Hawley and Pytkowicz, 1973), à l'hypothèse sur la valeur de  $P_{CO_2}$  dans l'eau équivalente à celle à la couche limite, ou encore à des inhibiteurs ou catalyseurs de même qu'à des mécanismes non encore identifiés.

Une étude (Dreybrodt and Buhmann, 1991) a montré que l'application du modèle PWP (modèle de Plummer, - Wigley- Parkhurst) pour estimer la vitesse totale de la dissolution-précipitation de la calcite d'une eau karstique, requiert que l'écoulement de l'eau soit turbulent. C'est-à-dire qu'il n'y pas de couche de limite ( $\varepsilon=0$ ). Ils ont aussi montré que l'augmentation de  $\varepsilon$  engendre une réduction de la vitesse de précipitation de la calcite.

Malheureusement, dans un système d'eau naturelle, il y a souvent une couche de limite contrôlée par la diffusion ( $\varepsilon$  : épaisseur de l'échelle de  $10^{-2}$  à  $10^{-3}$  cm) qui engendre que la vitesse  $R_{totale}$  calculée dans le modèle PWP (Tableau 9) est une dizaine fois plus grande que celle observée (Liu et al., 1995).

Ces auteurs ont observé dans une étude expérimentale que dans une eau animée d'une vitesse supérieure à  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  la cinétique mesurée est 5 à 10 fois plus petite que la cinétique calculée. Pour une flaque d'eau (vitesse nulle) cet écart est de 20 à 50 fois plus petit.

Par contre, l'application du modèle DBL (couche limite de la diffusion dans Tableau 9), réduit cet écart d'un facteur 2. Ce modèle DBL s'applique bien pour le cas de faible pH ( $< 5,5$ ), où le mécanisme de la dissolution de la calcite est contrôlé par le transport de  $H^+$ . Quand le pH est supérieur à 5,5, le mécanisme de la dissolution de la calcite est contrôlé par la cinétique des réactions de la dissolution - précipitation de calcite à l'interface de solide-liquide (Berner and Morse, 1974).

Mais, un simple modèle de convection-diffusion-réaction ne suffit pas à décrire les processus de la dissolution de la calcite (Dreybrodt, 1988), une répartition (masse et balance de charge) des espèces proches de la surface de la calcite dans la couche de limite doit être pris en compte .

En conclusion, le modèle PWP permet avec succès d'estimer la cinétique de la précipitation de la calcite dans les systèmes aquatiques naturels dans les conditions

suivantes : écoulement rapide, faible salinité (faible force ionique <1 mol/l), faible température (<60°C), eau chargée de CO<sub>2</sub>.

Tableau 9: Synthèses des modèles/équations de la cinétique de la calcite

Système	Citation	Equation	
CaCO <sub>3</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O (Karst water) Et Ca <sup>2+</sup> - Mg <sup>2+</sup> - K <sup>+</sup> - Na <sup>+</sup> - Cl <sup>-</sup> -SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O (5 à 60°C ; P <sub>CO2</sub> de 0 à 0,97 atm)	PWP équation	$R_{dis} = K_1(H^+) + K_2(H_2CO_3^*) + K_3(H_2O)$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> * = H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> aq libre Log K <sub>1</sub> = 0,198 - 444/T ; E <sub>a</sub> = 2 Kca/ mol ; Log K <sub>2</sub> = 2,84 - 2177/T ; E <sub>a</sub> = 10 Kca/ mol ; Log K <sub>3</sub> = -5,68 - 317/T ; si T < 298,15 K ; E <sub>a</sub> = 1,5 Kca/ mol ; Log K <sub>3</sub> = 1,10 - 1737/T ; si T > 298,15 K ; E <sub>a</sub> = 7,9 Kca/ mol ;	équ.18
		$R_{totale} = K_1(H^+) + K_2(H_2CO_3^*) + K_3(H_2O) - K_4(Ca^{2+}) * (HCO_3^-)$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s K <sub>4</sub> = K <sub>2</sub> / K <sub>C</sub> {K <sub>1</sub> ' + 1/(H <sup>+</sup> )[K <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> * ) + K <sub>3</sub> (H <sub>2</sub> O)]}; K <sub>1</sub> ' remplacé par K <sub>1</sub> ; K <sub>1</sub> ' ≈ (10 ~ 20)K <sub>1</sub>	équ.19
		$R_{totale} = K_3(H_2O)(1 - \Omega^*(H^+)/(H^+)_{surface})$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s pour le cas pH <7, P <sub>CO2</sub> < 0,03 atm ;	équ.20
		$R_{totale} = 1,14 * 10^{-7} (1 - \Omega^*(H^+)/(H^+)_{surface})$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s pour le cas pH >5,5, P <sub>CO2</sub> < 0,03 atm à 20 °C	équ.21
Karst water	(Dreybrodt and Buhmann, 1991; Dreybrodt et al., 1992a)	$R_{dis} = (D/\epsilon) * ([Ca^{2+}]_{eq} - [Ca^{2+}]_{aq})$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s D : constante de la diffusion, 7,1 * 10 <sup>-6</sup> cm <sup>2</sup> /s à 20 °C; [Ca <sup>2+</sup> ] <sub>eq</sub> : concentration à l'équilibre, 15,4mol/l à 20°C (pour gypse); pour calcite vu dans <b>Tableau 8</b> ; [Ca <sup>2+</sup> ] <sub>aq</sub> : concentration instantanée dans l'eau ; ε: épaisseur de la couche de limite (cm ; vu dans <b>Tableau 14</b> )	équ.22
0,7 M KCl dans système fermé à P <sub>CO2</sub> CaCO <sub>3</sub> -CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O 5 à 60 °C	(Sjöberg, 1976, 1978)	$R_{dis} = k * A * (C - [Ca^{2+}]^{1/2} [CO_3^{2-}]^{1/2})$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s K : le constante de la vitesse (9,5* 10 <sup>-6</sup> S <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> à 20 °C) ; E <sub>a</sub> = 8,4 kcal/mol ; A : la surface de la calcite ; C : [Ca <sup>2+</sup> ] <sup>1/2</sup> [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] <sup>1/2</sup> à l'équilibre ;	équ.23
		$R_{totale} = 1,6 * 10^{-6} (1 - \Omega^{1/2})$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s pour le cas pH >5,5, P <sub>CO2</sub> < 0,03 atm à 20 °C	équ.24
Eau de la mer à 25°C, P <sub>CO2</sub> 10 <sup>-2,5</sup> atm		$R_{totale} = k * (\Omega - 1)^n$ ; en mmol/cm <sup>2</sup> /s n : ordre de réaction (Calcite : 2,53 à 3,27 ; aragonite : 1,8 à 2,36) ; k : le constante de la vitesse, mol/cm <sup>2</sup> /s ; log k=-12,567 - 0,27275 ([Mg <sup>2+</sup> ]/[Ca <sup>2+</sup> ]) ; [Mg <sup>2+</sup> ]/[Ca <sup>2+</sup> ] <10,3	équ.25
		logk=0,9475-0,22785([SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]/[Ca <sup>2+</sup> ]);mg/min/g; [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] : 0,003 à 0,05 mol/l	
NB : R <sub>dis</sub> – la vitesse de la dissolution ; R <sub>totale</sub> - la vitesse totale de la dissolution et précipitation ; (H <sup>+</sup> ) <sub>surface</sub> - activité de H <sup>+</sup> sur la surface de la calcite			



Par contre, ce modèle s'applique moins bien pour l'eau de mer et la sédimentation profonde en mer (Sanjuan and Girard, 1996), ou pour un courant laminaire où l'effet de la couche de limite existe, par exemple, pour une eau peu profonde (quelques centimètres dans le cas de Chauconin). L'estimation de la cinétique de la formation de la calcite dans ces eaux implique d'utiliser le modèle DBL. Mais dans tous les cas, la spéciation surfacique doit toujours être prise en compte dans les calculs. Ce chapitre de bibliographie alimente les chapitres de présentation des résultats et de modélisation de ce mémoire.

### 2.2.3 La cinétique de la précipitation-cristallisation de calcite

Ce paragraphe synthétise les données cinétiques trouvées dans la littérature sur la précipitation et la cristallisation (Tableau 10 et Tableau 11) de la calcite dans le but de les comparer à nos résultats d'analyse d'eau et de cinétique (chapitre 6).

La précipitation de la calcite peut être contrôlée par 3 mécanismes décrits par les 3 équations suivantes :



Tableau 10: Synthèse des constantes de la cinétique trouvées dans la littérature

Equation		$K_v$	Référence
$\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ ;	Eq. 10	$5 * 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ; si $1,72 * 10^{-4} \text{ M}$ dissocié	Eq. 11	$10^7 \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
		$3,3 * 10^6 \text{ S}^{-1}$	
$\text{CO}_2 \text{ aq} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ; si pH < 9 ; $K_{v-\text{CO}_2}$	Eq. 12	$(3,7 \pm 0,2) * 10^{-2} \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
		Log $K_{v-\text{Eq. 12}} = 29,85 - 110,54 \log T - 17265,4/T$ ; $T = 273,15 + T^\circ\text{C}$ ; $2,6 * 10^{-2} \text{ S}^{-1}$ à $25^\circ\text{C}$	(Usdowski, 1982)
$\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 \text{ aq} + \text{H}_2\text{O}$ ; si pH < 9 $K_{v-\text{H}_2\text{CO}_3}$	Eq. 13	$(1,8 \pm 0,7) * 10^1 \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
		$12 \text{ S}^{-1}$	(Dreybrodt et al., 1996)
		Log $K_{v-\text{Eq. 13}} = 13,558 - 3717,1 / T$ ; $T = 273,15 + T^\circ\text{C}$ ; $12,3 \text{ S}^{-1}$ à $25^\circ\text{C}$	(Usdowski, 1982)
$\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$ ; si pH > 9 $K_{v-\text{OH}^-}$	Eq. 14	$8,5 * 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
		Log $K_{v-\text{Eq. 14}} = 13,635 - 2985 / T$ ; $T = 273,15 + T^\circ\text{C}$ ; $4,2 * 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ S}^{-1}$ à $25^\circ\text{C}$	(Usdowski, 1982)
$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^-$ ; si pH > 9 $K_{v-\text{HCO}_3^-}$	Eq. 15	$2 * 10^{-4} \text{ S}^{-1}$	(Pocker and Bjorkquist, 1977)
		Log $K_{v-\text{Eq. 15}} = 14,09 - 5308 / T$ ; $T = 273,15 + T^\circ\text{C}$ ; $1,9 * 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ à $25^\circ\text{C}$	(Usdowski, 1982)

NB:  $K_v$ : constant de la vitesse ( $K_v$ ) d'une réaction à  $25^\circ\text{C}$

Pour un système riche en bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), la présence de  $\text{CO}_2$  ne change pas le pH de la solution car  $\text{HCO}_3^-$  a un pouvoir tampon. Les équations (Eq. 7 et Eq. 9) restent sans effet. Cependant, la  $\text{PCO}_2$  ne peut varier dans l'équation Eq. 8 que si l'hydratation de  $\text{CO}_2$  (Eq. 1 et Eq. 2) est suffisamment rapide afin d'engendrer une accumulation de  $[\text{H}_2\text{CO}_3]$  dans l'eau.

En fait, la constante de vitesse ( $K_v$ ) de déshydratation (Dreybrodt et al., 1996; Pocker and Bjorkquist, 1977) est plus grande que la vitesse d'hydratation (échelle de  $(12 \text{ à } 18 \text{ s}^{-1} \text{ v.s. } 10^{-2} \text{ s}^{-1})$ ; Tableau 10). Il s'ensuit une augmentation de  $\text{CO}_2$  dissout dans l'eau, et le  $\text{H}_2\text{CO}_3$  ne peut pas s'accumuler. Ce scénario peut être une explication pour laquelle la cinétique de la dissolution de calcite ne varie pas en fonction de la présence de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (Xu et al., 2012).

La plupart des études (Reddy, 1978; Wiechers et al., 1975; Reddy and Nancollas, 1973, 1971) concernant la cristallisation de la calcite sont faites en condition alcaline : le pH est entre 8 et 10, avec une faible  $\text{PCO}_2$  comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^{-5}$  atm.

Il existe peu de recherches dans des conditions légèrement acides, mais Nancollas a étudié la cristallisation à pH 6 avec une  $\text{PCO}_2$  élevée de 1,7 atm. Comme d'après l'étude de Usdowski (Usdowski, 1982) qui indique qu'à partir de pH 8, la cinétique d'hydratation de  $\text{CO}_2$  à  $\text{HCO}_3^-$  est proportionnelle au pH, l'augmentation du pH engendrera une cinétique de conversion de  $\text{CO}_2$  10 fois plus rapide.

Tableau 11: Synthèse de la cinétique de la cristallisation de la calcite

Système	Citation	Cinétique obtenue
Eau de la mer à 25 °C avec $\text{PCO}_2$ de $10^{-2,53}$ atm	(Morse, 1978)	$R_{\text{totale}} = 8 \text{ mg/cm}^2/\text{an}$ $= 2,54 * 10^{-9} \text{ mmol/cm}^2/\text{s}$
$\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (5 à 60°C ; $\text{PCO}_2$ de 0 à 0,97 atm)		$R_{\text{totale}} = 2 \text{ à } 80 * 10^{-9} \text{ mmol/cm}^2/\text{s}$
Eau de source - travertin	(Herman and Lorah, 1988)	$R_{\text{totale}} = 2 * 10^{-8} \text{ à } 3 * 10^{-6} \text{ mmol/cm}^2/\text{s}$
$\text{Ca - Mg - HCO}_3^-$ - tuf	(Liu et al., 1995)	$R_{\text{totale}} \approx 5 \text{ mm/an} = 4 * 10^{-7} \text{ mmol/cm}^2/\text{s}$
NB : $R_{\text{totale}}$ la vitesse totale de la précipitation en prenant en compte la dissolution;		

## 2.3 Les facteurs de contrôle de la précipitation

Selon plusieurs études, les paramètres qui ont une influence sur les processus de la précipitation de la calcite sont classés en trois groupes : les paramètres thermodynamiques, hydrodynamiques et environnementaux. La forme et la texture de la calcite précipitée sont dépendantes des conditions de précipitation, par exemple :

- la sursaturation initiale ( $\Omega$ ) (Arvidson and Luttge, 2010; Aagaard and Helgeson, 1982),
- la température ,
- le pH (Ruiz-Agudo et al., 2011; Dietzel et al., 2009; Sjöberg and Rickard, 1984),
- la vitesse d'agitation ou nombre de  $Re$  ,
- la présence d'impuretés (ions/molécules étrangères) (Shi et al., 2013; Lin and Singer, 2009; Vavouraki et al., 2008; Reddy, 1977; Reddy and Nancollas, 1973b)
- la présence d'une surface solide agissant comme un substrat de la précipitation - cristallisation .

### 2.3.1 Les paramètres thermodynamiques

Les paramètres thermodynamiques les plus importants sont le degré de saturation d'une solution concernée ( $\Omega$ ) et la solubilité de  $CaCO_3$  ( $K_s$ ). Une synthèse des valeurs de  $K_s$  trouvées dans la littérature pour diverses formes de  $CaCO_3$  est faite dans le Tableau 12.

#### a) $K_s$ en fonction de la $T^\circ C$ et la force ionique

Tableau 12: Synthèse de  $K_s$  pour diverses formes de  $CaCO_3$  dans la littérature

Forme de $CaCO_3$	$K_s$ à $25^\circ C$	Taille des germes	Conditions à former
Amorphe	$10^{-(6,393 \pm 0,015)}$	50 à 400 nm	$\Omega > 40$ ; 10 à $50^\circ C$
$CaCO_3 \cdot 6H_2O$	$10^{-(7,461 \pm 0,005)}$	10 à 40 $\mu m$	$\Omega > 40$ ; -10 à $5^\circ C$
$CaCO_3 \cdot H_2O$	$10^{-(7,61 \pm 0,03)}$	15 à 30 $\mu m$	$\Omega > 40$ ; 10 à $50^\circ C$ ; Sédimentation du lac ; présence de Mg ou condition de résonance
Vatérite	$10^{-(7,913 \pm 0,02)}$	$\sim 3,2 \mu m$	$10 < \Omega \leq 40$ ; 10 à $45^\circ C$ ; $(Ca^{2+})/(CO_3^{2-})=1$ ; $9,3 < pH < 9,9$
Aragonite	$10^{-(8,336 \pm 0,02)}$	$\sim 3 \mu m$	$\Omega > 1$ ; présence de Mg ; $> 40^\circ C$
Calcite	$10^{-(8,48 \pm 0,02)}$	$\sim 3 \mu m$	$\Omega > 1$ ; $< 40^\circ C$

NB : les données de  $K_s$  sont récupéré dans la littérature (Brečević and Kralj, 2007; Plummer and Busenberg, 1982).

La solubilité du carbonate de calcium ( $K_s$ ) est dépendante de la température ( $T^\circ C$ ) et la force ionique ( $I$ ) (Logan, 1967), notamment s'il y des ions communs qui ont pour

effets de diminuer la solubilité et d'engendrer la sursaturation. Une étude expérimentale en 1960 a indiqué que la vitesse de nucléation de la calcite est proportionnelle à la racine carrée de la force ionique (Bischoff, 1968).

Cette relation a aussi été confirmée par d'autres chercheurs pour des expérimentations avec une force ionique  $I < 1 \text{ mol/l}$  (Zuddas and Mucci, 1998a). Ces auteurs ont aussi montré que la force ionique a pour effet de modifier le polymorphisme du carbonate de calcium. L'augmentation de la force ionique (salinité) favorise la formation d'aragonite pendant la précipitation (Evans, 2012; Stephenson et al., 2011).

La température a aussi une influence sur la précipitation de la calcite. Son effet sur le système calco-carbonique est synthétisé dans le Tableau 13. Basée sur la loi de van't Hoff (Michard, 2002), la température peut aussi accélérer ou limiter la cinétique (Constante cinétique  $k_v$ ). Les données expérimentales de cinétique sont listées dans le Tableau 10.

Tableau 13: l'effet de la température sur la thermodynamique et la cinétique

Equilibres	$K_i \sim T^\circ\text{C}$	$K_v \sim T^\circ\text{C}$
$\text{CO}_2 (\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2 (\text{aq})_{\text{libre}}$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_H \uparrow \alpha \downarrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow < \Delta \text{ inverse} \uparrow$
$\text{CO}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_0 \uparrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow < \Delta \text{ inverse} \uparrow$
$\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_1 \uparrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow > \Delta \text{ inverse} \uparrow$
$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_2 \downarrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow > \Delta \text{ inverse} \uparrow$
$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_e \downarrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow > \Delta \text{ inverse} \uparrow$
$\text{CaCO}_3 (\text{s}) \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	$T^\circ\text{C} \uparrow K_s \downarrow$	$\Delta \text{ avancer} \uparrow < \Delta \text{ inverse} \uparrow$

NB: constante de réaction  $K_i$  (concentration à l'équilibre); constant de la vitesse  $K_v$  (cinétique)

En résumé, l'augmentation de la température déplace l'équilibre du système calco-carbonique vers le sens d'une précipitation de la calcite. Cela aboutit selon les cas à la consommation d'hydrogencarbonate, la formation de carbonate ou la transformation d'acide carbonique en  $\text{CO}_2$  gazeux.

En couplant la température avec la conductivité, des auteurs ont trouvé que ces deux paramètres ont une influence significative sur la forme de cristallisation (Brečević and Kralj, 2007). Dans le cas de faible température et forte conductivité, les cristaux de calcite se forment à l'échelle micrométrique avec une grande surface spécifique. Dans le cas de haute température et faible conductivité, des cristaux de calcite se forment à l'échelle micrométrique avec une faible surface spécifique, c'est-à-dire, que les cristaux sont un peu plus gros et la structure des cristaux est plus compacte.

## b) $\Omega$ – degré de saturation

La dissolution – précipitation des minéraux est contrôlée par différents mécanismes selon la valeur du degré de saturation ( $\Omega$ ) (Burch et al., 1993). Si le  $\Omega$  est suffisamment élevé ( $\Omega > 40$ ), la précipitation de la calcite est spontanée (sans période d'induction) dans une solution sans germes (Legrand and Leroy, 1995). Le  $\text{CaCO}_3$  amorphe précipite d'abord à cause de sa solubilité, plus faible que celle des autres formes de  $\text{CaCO}_3$  cristallisé comme l'aragonite et la calcite (Brečević and Kralj, 2007; Nancollas and Reddy, 1971) ;

Dans une solution en présence des germes, la nucléation surfacique de la calcite peut apparaître spontanément avec un  $\Omega$  modéré :  $\Omega > 7$  ,  $\Omega > 2$  (Dove and Hochella, 1993); si le  $\Omega$  proche de 1,2 (proche de l'équilibre où  $\Omega=1$ ), la nucléation se forme très lentement (Sanjuan and Girard, 1996) ce qui confirme la théorie de « nucléation surfacique » montrée par Nielsen (Nielsen, 1964).

Des études in situ d'estimation la vitesse de la formation des dépôts de type travertin ont montré que le dépôt se forme à cause du dégazage de  $\text{CO}_2$  qui produit une sursaturation ( $\Omega$ ) de 5 à 10 fois plus élevée que dans l'eau initiale, puis engendre une augmentation du pH ainsi que  $\text{CO}_3^{2-}$  dans l'eau (Sanjuan and Girard, 1996).

On note aussi que plus le degré de saturation est élevé, plus la précipitation de la calcite est rapide, et moins le dépôt de calcite est compact. L'augmentation de la température, l'évaporation et l'ajout de sels d'ions communs ont tous pour effet d'augmenter la sursaturation qui va conduire à une précipitation de la calcite plus rapide.

### 2.3.2 Les paramètres hydrodynamiques

Les conditions hydrodynamiques d'une eau peuvent avoir plusieurs effets sur la dissolution/précipitation de la calcite via des actions différentes:

- modifier le processus de la dissolution/précipitation de la calcite et transporter les ions  $\text{H}^+$  de l'eau vers la surface des minéraux ;
- modifier le processus de la dissolution/précipitation de la calcite via la diffusion du  $\text{CO}_2$  de l'eau vers la surface des minéraux (Dreybrodt and Buhmann, 1991) ;
- faire varier la barrière d'énergie d'activation ( $E_a$ ) de la réaction de dissociation du  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (bibliographie synthétisée dans le Tableau 14).

L'état hydrodynamique peut être décrit par le nombre de Reynolds (Re) qui traduit le niveau de turbulence de l'écoulement.

Des auteurs ont déclaré que la conversion de CO<sub>2</sub> est essentiellement dépendante de la vitesse d'agitation. L'expression de K<sub>1</sub> (la constante de vitesse de dissolution liée au transport de H<sup>+</sup> - voir Figure 13) est quasiment proportionnelle à l'agitation dans une solution acide (pH < 5,5) et toujours dépendante de l'agitation pour un pH élevé : par exemple, à pH 8 (Sjöberg, 1976). Cette observation a été largement confirmée par d'autres études (Barton and Vatanatham, 1976; Lund et al., 1975; King and Liu, 1933).

Tableau 14: Synthèse des études de facteurs hydrodynamique sur la conversion de CO<sub>2</sub>

Etude	V <sub>ag</sub> (rpm)	Re	ε (cm)	E <sub>a</sub> (kcal /mol)
(King and Liu, 1933)	4000	126200	7,9*10 <sup>-4</sup>	5,6
	1800~ 2300	56790~72565	1,2*10 <sup>-3</sup> ~ 10 <sup>-3</sup>	2,0
	500	15775	2,2*10 <sup>-3</sup>	2,5

NB : E<sub>a</sub> - énergie d'activation pour H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dissocié à HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>; V<sub>ag</sub> - vitesse d'agitation (rpm : cycle par minute) ; Re – le nombre de Reynolds (Re < 10<sup>-4</sup> laminaire, Re > 3\*10<sup>-5</sup> turbulent) ;

Quand l'eau est saturée en CO<sub>2</sub> (pH ≈ 3,9) et coule sur la surface de la calcite à température constante de 25°C, la vitesse de la dissolution de calcite (R<sub>dis</sub>) varie avec la vitesse de l'eau injectée (V<sub>eau</sub>) : le K<sub>1</sub> varie de 0,11 à 0,23 cm/s quand la V<sub>eau</sub> passe de 18 à 35 m/s (Weyl, 1958).

Une étude expérimentale déjà évoquée (Liu et al., 1995) montre que la vitesse de la précipitation de la calcite (R<sub>totale</sub>) dans un écoulement rapide (50 à 200 cm/s) est de 2,2 à 5,4 fois plus rapide que dans une flaque d'eau stagnante. Cette observation a été confirmée par une étude expérimentale sur modèle réduit (canal en condition laminaire sans et avec barrage (Hammer et al., 2008)). Les auteurs ont trouvé qu'au niveau des barrages, l'écoulement devient turbulent localement ce qui favorise le dégazage de CO<sub>2</sub>, augmente la sursaturation, puis la calcite précipite derrière le barrage en formant des marches d'escalier.

Ces études précédentes soulignent l'influence de l'hydrodynamique sur la cinétique de précipitation de la calcite. Ceci peut avoir un vrai intérêt dans l'objectif d'optimiser la géométrie du drainage ferroviaire afin de pouvoir gérer au mieux les zones de précipitation ou au contraire de non-précipitation afin de faciliter la maintenance.

### 2.3.3 Synthèses des différents paramètres

Les paramètres naturels et ferroviaires (géologie, matériaux géotechniques) peuvent être source de réactifs et source de catalyseurs/inhibiteurs et jouer un rôle sur la précipitation de la calcite.

Le calcium peut venir de l'eau souterraine ou de la lixiviation des sols ou des matériaux géotechniques qui le composent : la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), la magnésite ( $\text{MgCO}_3$ ) et le portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dans les ciments de béton.

Les carbonates peuvent être aussi fournis comme le calcium via la dissolution des matériaux carbonatés. En dehors de ces sources solides, il y a aussi les autres sources liquides ou gazeuses, comme par exemple, les eaux souterraines qui sont riches en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_2$  dissout, et bien évidemment le  $\text{CO}_2$  gazeux dans l'air et les sols ( $\text{PCO}_2$ ).

Les acides fulviques et humiques (source de  $\text{H}^+$ ) trouvés dans certains types de sol favorisent la dissolution de la calcite. A contrario, des métaux traces peuvent jouer un rôle d'inhibiteur de la précipitation de la calcite. Cette partie est détaillée à la fin de ce paragraphe.

#### a) $\text{P}_{\text{CO}_2}$ de l'air et le pH

L'implication de ces deux paramètres dans les mécanismes de dissolution/précipitation de la calcite, est basée sur les travaux de Plummer, illustré dans le Figure 13 .

Selon le rôle de ces deux paramètres, il y a trois mécanismes :

- Pour un cas de température constante à  $25^\circ\text{C}$ , quand le  $\text{pH} < 3$ , la vitesse de la dissolution ( $R_{\text{dis}}$ ) est dépendante de l'activité de  $\text{H}^+$  dans la solution, mais indépendante de la  $\text{pCO}_2$ .
- Quand le  $\text{pH}$  est compris entre 3 et 5,5, la  $R_{\text{dis}}$  est dépendante du  $\text{pH}$  et la  $\text{pCO}_2$ , mais la  $\text{pCO}_2$  joue peu de rôle (la variation de la vitesse est inférieure de la grandeur de 10 vis-à-vis une variation de  $\text{pCO}_2$  de 1 atm).
- Quand le  $\text{pH} > 5,5$ , et si la  $\text{pCO}_2 < 0,03$  atm (pour le cas de l'eau superficielle), la  $R_{\text{dis}}$  est indépendante du le  $\text{pH}$  et de la  $\text{pCO}_2$ .

La Figure 13 présente les effets du pH et la pCO<sub>2</sub> sur le processus de dissolution de la calcite à 25°C :

- Quand on est sous la courbe 1, H<sup>+</sup> est le réactif dominant le processus de dissolution.
- Quand on est au dessus de la courbe deux, c'est la concentration H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>\* qui domine la dissolution ;
- Quand on est en dessous de la courbe 3 la dissociation de l'eau devient le facteur déterminant de la dissolution de la calcite.
- Entre ces trois courbes, les trois réactifs contribuent à la dissolution de la calcite.

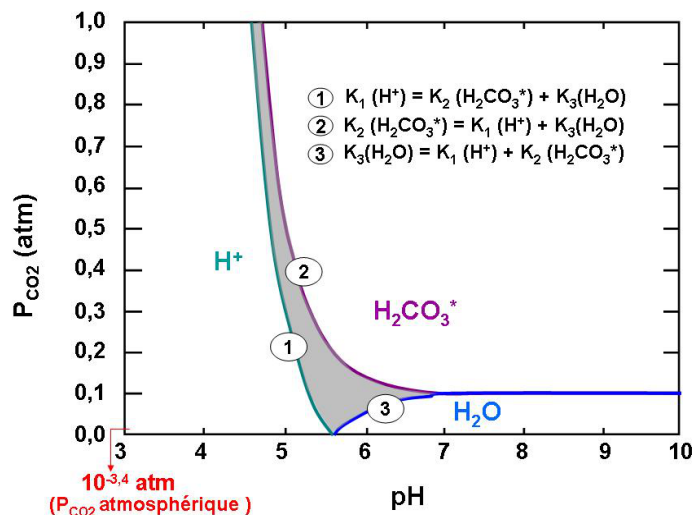


Figure 13 : Les contributions du pH et P<sub>CO<sub>2</sub></sub> à la vitesse de dissolution de calcite à 25°C

NB : le graphique est récupéré de la recherche de Plummer

En résumé, l'augmentation de la pCO<sub>2</sub> et une diminution du pH favorisent la dissolution de la calcite.

#### b) Caractéristiques de la surface de substrat

La surface des particules de calcite a été identifiée comme un facteur de contrôle de la formation de calcite en écoulement laminaire, sous une pCO<sub>2</sub> proche de 1 atm (Erga et al., 1956). La vitesse de dissolution de la calcite augmente si la rugosité de la surface



de la calcite s'accroît (Keysar et al., 1994; Compton et al., 1986) et peu doubler par rapport à la surface géométrique du substrat de calcaire (Svensson and Dreybrodt, 1992).

La mouillabilité du substrat sur lequel la calcite précipite joue aussi un rôle (Girou and Roques, 1971). Plus la mouillabilité est importante, plus la calcite précipite et l'adhésion est forte. Une liste de substrats de mouillabilité décroissante confirmée par (Chibowski et al., 2003) a été proposée par ces auteurs : Acier inoxydable poli < plexiglas rayé < verre < plexiglas < polychlorure de vinyle (PVC).

Des études récentes (Yee, 2015; Yee et al., 2012) ont été menées au laboratoire pour tester et quantifier la vitesse d'accroissement de la calcite sur diverses surfaces plastiques. Ces auteurs ont trouvé que la quantité de calcite précipitée pendant 28 jours sur un substrat de polytétrafluoroéthylène (PTFE) et polydiméthylsiloxanes (PDMS) est quatre fois moins que celle précipitée sur du PVC.

Des études similaires ont été faites sur les substrats silicatés. Il a été trouvé que la calcite adhère plus rapidement sur des surfaces de labradorite, olivine, enstatite et périclase, et moins sur des surfaces d'augite et de verre basaltique. Ces auteurs ont aussi trouvé que la vitesse d'accroissement de la calcite sur les divers substrats devient proche sur des temps longs (une dizaine de jours). La vitesse est indépendante du substrat et autour de  $10^{-14}$  mmol/cm<sup>2</sup>/s.

Dans notre cas, si cette tendance est similaire pour tous les substrats minéraux, on peut assumer qu'à l'échelle de l'année (échelle de maintenance du drainage ferroviaire), la quantité totale de calcite précipitée sera indépendante de la nature des drains (béton ou thermoplastique).

### c) Impuretés – inhibiteurs ou catalyseurs

Les impuretés naturelles ou artificielles influencent le processus de précipitation de calcite soit en agissant comme des catalyseurs qui accélèrent la formation de calcite ; soit en agissant comme des inhibiteurs qui ralentissent la formation de calcite. Elles agissent par divers mécanismes :

Des molécules organiques, par exemple, l'acide citrique et l'acide fulvique peuvent limiter la formation de la calcite en modifiant la charge surfacique de la matrice de la calcite (Brečević and Kralj, 2007);

L'incorporation de cations divalents - Mg<sup>2+</sup> (Kawano et al., 2016; Lin and Singer, 2009), Zn<sup>2+</sup> (Shi et al., 2013), Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> (Cave and Talens-Alessio, 2005; Freund et al., 2004), Cu<sup>2+</sup> (Leybourne et al., 2013; Zhang et al., 2013), Sr<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> (Pérez-Garrido et al., 2007; Chada et al., 2005), Ba<sup>2+</sup> (Hori et al., 2013; Ischenko et al., 2007) et Pb<sup>2+</sup> (Du

et al., 2011; Chada et al., 2005) - dans la matrice de calcite ou de vaterite conduit à la déformation du réseau cristallin et à l'augmentation de la rugosité de surface.

Les anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  sont considérés comme des inhibiteurs de la formation de la calcite et vont accélérer la précipitation d'autres formes de  $\text{CaCO}_3$ : souvent l'aragonite par exemple (Brečević and Kralj, 2007).

Dans notre cas, dans la perspective de trouver une solution réalisable afin de ralentir la formation de la calcite et aussi pour faciliter la maintenance du collecteur drainant, ces deux ions :  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  sont très intéressants car ils peuvent aussi modifier les propriétés de la calcite et l'arrangement de la matrice à cause des incorporations des ions étrangérés.

Dans l'eau naturelle qui souvent a un potentiel entartrant, les deux ions ( $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) sont souvent déjà présents, surtout dans un aquifère du système de calcite-dolomite-gypse. Ils présentent moins de risque pour l'environnement que les métaux traces et les phosphates. De ce point de vue, certaines matières organiques biodégradables sont aussi des choix potentiels, par exemple : des polysaccharides (Zhang et al., 2016), et l'acide poly-aspartique .

Selon le degré de saturation de l'eau initiale, le  $\text{Mg}^{2+}$  ajouté peut se comporter différemment : soit comme un inhibiteur de la nucléation-cristallisation de la calcite ; soit comme un catalyseur de la nucléation de l'aragonite (Wang et al., 2013; Ries, 2005; Reddy and Nancollas, 1976).

Une étude expérimentale a attesté que la présence de  $\text{Mg}^{2+}$  (à l'échelle de  $10^{-4}$  mol/l) peut ralentir de 10 à 20 fois la vitesse de la précipitation de la calcite . Des études (Kawano et al., 2016; Meldrum and Hyde, 2001) ont montré qu'au lieu d'une forme rectangulaire, la calcite croît, dans une solution en présence de  $\text{Mg}^{2+}$ , sous une forme de disque. Le  $\text{Mg}^{2+}$  limite l'accroissement vertical à cause de son incorporation dans la matrice qui cause des défauts verticaux.

L'ajout de  $\text{SO}_4^{2-}$  produit des agrégats sphériques de calcite au lieu de la calcite rhomboédrique (Brečević and Kralj, 2007). Ces agrégats sphériques se forment souvent dans une solution de haute sursaturation ( $\Omega > 30$ ) et de pH élevé (pH  $> 10,5$ ). Cette étude a aussi montré que le  $\text{Cl}^-$  ajouté a la même influence que le  $\text{SO}_4^{2-}$  ajouté, mais le  $\text{NO}_3^-$  ajouté ne montre pas d'impact sur l'agrégation de la calcite.

Une étude récente a montré que la période d'induction des germes de la calcite dans une solution sursaturée a été largement réduite avec la présence de sulfate de calcium à une échelle de temps d'une dizaines de minutes. Les auteurs ont souligné que la germination de la calcite devient spontanée dès que la concentration de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  dépasse 40 mmol/l.

Une autre étude (Vavouraki et al., 2008) a utilisé des gammes plus faibles pour étudier l'impact de  $\text{SO}_4^{2-}$  sur la cinétique de la formation de la calcite. Les auteurs ont trouvé qu'en ajoutant du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à une concentration inférieure à 0,05 mmol/l, la vitesse de la formation de la calcite (germination plus cristallisation) n'est pas changée. L'augmentation de la vitesse de formation de la calcite devient forte quand la  $[\text{SO}_4^{2-}]$  est entre 2 à 3 mmol/l. Au delà de 60 mmol/l, la vitesse globale de la formation de la calcite diminue substantiellement. A partir de 5 mmol/l de  $\text{SO}_4^{2-}$ , l'accroissement de la calcite couche par couche est modifiée par l'augmentation de la rugosité de la surface à cause de l'incorporation de sulfate dans la matrice de la calcite.

Une thèse (Teghidet, 2012) a aussi confirmé que l'effet retardateur des sulfates sur la précipitation de la calcite est observé dans la solution avec une concentration  $[\text{SO}_4^{2-}]$  supérieure à 100 mmol/l.

En comparant les trois études précédentes, on déduit que la concentration de  $[\text{SO}_4^{2-}]$  limite la vitesse globale de la formation de la calcite en ralentissant la vitesse de la cristallisation.

Dans notre cas, dans le but de tester cet inhibiteur, la limite supérieure de la  $[\text{SO}_4^{2-}]$  (> 60 ou 100 mmol/l) qui indique une diminution de la vitesse de la formation de la calcite va devenir essentielle pour guider nos travaux.

#### d) Des promoteurs énergétiques

Dans le domaine de traitement d'eau, en dehors des traitements chimiques (acides, inhibiteurs ionique, résine des ions échanges) et électrochimiques (électrocoagulation sur une surface de cathode), des techniques physiques pour limiter l'entartrage sont aussi beaucoup étudiées et testées. Les techniques les plus étudiées sont les ultrasons, les champs magnétiques et électromagnétiques.

Les ultra-sons peuvent être utilisés dans l'eau stagnante, ils causent des micro-cavitations acoustiques dans l'eau et amènent à la production de particules de calcite plus petites (Shirsath et al., 2015; Boels et al., 2010). Au milieu de nombreux travaux qui ont indiqué que le traitement ultrasonique favorise la précipitation de calcite sous la forme de petites particules, un seul constate le contraire (Miyasaka et al., 2006).

Les traitements magnétiques ont été beaucoup étudiés pour leurs effets d'inhibition de la vitesse de la formation de la calcite dans l'eau, dans le domaine des tunnels (Yee, 2015; Yee et al., 2015, 2012; Dietzel et al., 2008; Girmscheid et al., 2003) et de traitement d'eau industrielle, en particulier les tuyaux et installations de chauffage d'eau.

Ce traitement provoque la formation d'un mélange de calcite et aragonite de faible résistance mécanique .

L'efficacité des techniques ultrasonique ou magnétique varie selon les conditions hydrauliques (stagnantes ou courantes) et l'intensité, la fréquence, la durée des champs acoustiques ou magnétiques utilisés. Dans une application industrielle, ces conditions jouent un rôle essentiel vis-à-vis du résultat du traitement. Actuellement, aucune étude ne montre un effet significatif des techniques ultrasonique ou magnétique dans le contexte ferroviaire.

#### **2.3.4 Terminologie pour décrire la calcite précipitée dans divers domaines**

Dans le but de bien définir le sujet et le cadre de la thèse afin de lister des objectifs réalistes en termes scientifiques en répondant aux enjeux ferroviaires (chapitre3), il importe de préciser les termes qui décrivent la formation de calcite dans différents domaines hors laboratoire.

Stalactite – stalagmite : en géologie, il s'agit de calcite précipitée à partir de gouttes d'eau selon des formes verticales descendantes (stalactite) ou montante (stalagmite).

Tuf – travertin : dans certaines zones karstiques où il y a des activités géothermales ou volcaniques, du CO<sub>2</sub> profond est émis dans l'atmosphère par dégazage, ce qui provoque la formation de grandes quantités de tuf (« tufa » en anglais) calcaire (Liu et al., 1995). Quand ces dépôts calcaires ont une forme en « escalier » et souvent couverts d'algues, ils sont appelés travertins (« travertine » en anglais). Le travertin de calcite se forme à cause du dégazage rapide de CO<sub>2</sub> (le pH augmente alors rapidement) (Yuan and Liu, 1998).

Entartrage (« Scaling » en l'anglais) - Encrassement (« fouling ») : dans le domaine du traitement de l'eau, surtout dans les réseaux de distribution d'eau en charge, la calcite se forme sur la surface interne des tuyaux, vannes, et autres installations à la température ambiante. C'est un processus d'entartrage (« scaling » en l'anglais) (Ghobadinia et al., 2010; Legrand and Leroy, 1995) et le dépôt est appelé tartre (« scale » en l'anglais). Par contre, le terme « Encrassement » (« fouling » en l'anglais) est plutôt utilisé dans le cas où la calcite se forme lors d'une baisse de température sur une grande surface plate. Ainsi, la calcite se forme dans des chaudières et installations de chauffage d'eau : radiateurs le plus souvent . Les chercheurs font rarement la différence entre les deux mots.

Carbonatation – calcification : dans un processus chimique ou biochimique, le mot carbonatation décrit toutes les réactions qui solidifient l'élément carbone de l'air et de

l'eau. La calcification décrit toutes les réactions qui solidifient l'élément calcium de l'air de l'eau.

Eau Incrustante - calcifiante – allogénique : dans l'ingénierie, une eau qui favorise la précipitation de la calcite vis-à-vis sur une surface solide est souvent dite « incrustante » ou « calcifiante ». Le mot « allogénique » est utilisé dans le domaine de l'hydrogéochemie, souvent dans un système de Karst. Une eau allogénique est une eau qui se charge en calcium et hydrogénocarbonate via la dissolution des matériaux pendant son parcours et puis re-précipite la calcite lors de modifications de ses conditions (perte de charge, CO<sub>2</sub> ou changement de régime d'eau etc.).

Adoucir (« soften » en l'anglais) : c'est un mot issu du vocabulaire de l'ingénierie qui décrit les actions ou processus mis en oeuvre pour baisser la dureté de l'eau via l'élimination du calcium et du magnésium dissouts dans l'eau.

## **2.4 Epilogue : définition scientifique de la problématique ferroviaire**

Sur la base de la bibliographie, la problématique du collecteur drainant (CD) colmaté peut être imputée à la formation de calcite à l'intérieur du collecteur drainant ou autour des entrées d'eau. C'est une problématique complexe, multi milieux, multi phases et multi paramètres.

Mais surtout, c'est une problématique de dissolution et re-précipitation de calcite dans des conditions ambiantes de température et pression via les processus de chimie inorganique dans une eau douce (faible force ionique par rapport à celle de l'eau de mer), limitée par le contexte hydrodynamique externe et interne du CD.

Le système du CD peut être divisé en deux sous système :

- l'environnement externe du CD (Système de bassin versant en amont) où la dissolution des minéraux comprenant calcium et carbonates est dominante;
- l'intérieur du collecteur drainant (Système du CD lui-même) où la précipitation de la calcite est dominante.

Ces processus ressemblent beaucoup à un KDS (Dynamique System de Karst : aussi un système conceptuel de CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CaCO<sub>3</sub>) à échelle micro, car ce dernier se produit à une échelle de temps géologique, et aussi souvent sous l'effet de la biosphère (Yuan and Liu, 1998).

Ce type de système conceptuel de CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CaCO<sub>3</sub> peut être caractérisé d'abord par les dépôts déjà formés : calcite ou aragonite. Puis son comportement peut être identifié

par les relations mutuelles parmi 4 paramètres : la température, le pH, les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_2$  dans l'eau. Par exemple, quand la calcite se forme et provoque un dégazage de  $\text{CO}_2$ , vers l'air. Par voie de conséquence le pH augmentera et  $\text{HCO}_3^-$  diminuera.

Au final, ces comportements peuvent être mis en relation avec les divers contextes environnementaux qui peuvent être classifiés par (Yuan and Liu, 1998): la pluie ; la température ; la  $p\text{CO}_2$  (Pression partielle de  $\text{CO}_2$ ) atmosphérique, le sol et la composition chimique de l'eau ; les conditions hydrauliques et chimiques de l'écoulement de l'eau.

Dans le du collecteur drainant (CD) de Chauconin, au niveau des fentes (l'entrée d'eau au voûte de tuyau), la formation de la calcite ressemble beaucoup celle de « stalactite », mais celle formée au fond du drain ressemble plus à de l'« entartrage ». Pour faciliter la lecture, dans les chapitres 3, 4 et 5 les termes généraux seront utilisés (entartrage, dépôts carbonatés, calcaire).

Par contre, dans la partie de présentation des résultats, d'analyse, de discussion et de modélisation, seront utilisées les terminologies beaucoup plus fines issues de la chimie ou de l'ingénierie dans l'objectif de comparaison avec d'autres études déjà publiées.



## **Chapitre3 Objectifs de la thèse**

### **3.1 Analyse des enjeux industriels**

Comme présenté au chapitre 1, le phénomène d'entartrage des dispositifs de drainage lié à la précipitation de matériau carbonaté dans le contexte ferroviaire est un phénomène complexe. C'est la conséquence de différents processus qui se déroulent dans plusieurs milieux (i.e. naturel, anthropique), et liés à diverses réactions multi-phasiques (solide, liquide, gazeuse). Ce phénomène de précipitation de carbonates de calcium est largement dépendant de facteurs aggravants liés à la conception (principe de la pose du drain) et à l'exécution. Ce phénomène a été très peu étudié dans le contexte ferroviaire et reste encore mal connu ; la bibliographie ne rassemble pas de manière exhaustive les facteurs aggravants et les évoque le plus souvent uniquement de manière qualitative. Par exemple, l'impact du fonctionnement de bassin versant (BV) en amont (sol naturels et plateforme ferroviaire) d'un drain colmaté n'est pas évoqué, ce qui constitue un manque pour mener les expertises sur cette question pour SNCF Réseau. La prévention en conception reste très limitée et la maintenance actuelle non optimale s'avère onéreuse.

Le phénomène d'entartrage engendre une suite de dysfonctionnements au sein du système ferroviaire causant des dommages à l'infrastructure, comme illustré dans le chapitre 1, dont on rappelle ici les principales manifestations à travers :

- L'obstruction du dispositif de drainage de la plateforme : il peut se produire soit au niveau des entrées d'eau et générer un défaut de drainage de la plateforme, et/ou au niveau du canal d'écoulement et générer des débordements. Le résultat est un risque d'inondation intermittent ou pérenne, localisé ou étendu à tout ou partie du système de drainage de la plateforme pouvant conduire à la dégradation de celle-ci par perte de ses caractéristiques mécaniques. S'en suivent alors des défauts de nivellement avec conséquence sur l'exploitation.
- L'obstruction du système de drainage des parois de tunnel : il s'agit de l'obstruction partielle ou complète des barbacanes dont le rôle est de drainer les eaux de l'encaissant de l'extrados vers l'intrados. Leur dysfonctionnement peut générer des sous-pressions au niveau de l'ouvrage pouvant affecter sa tenue structurelle. Par ailleurs les eaux qui ne sont plus drainées ont tendance à trouver de nouveaux chemins au travers des parois comme dans les joints



entre les moellons (sur ligne classique), créant des égouttures au pouvoir incrustant et fragilisant ces zones de l'ouvrage.

- Le recouvrement des parois des tunnels par des draperies qui avec le temps s'épaississent et peuvent engager le gabarit. Ces draperies peuvent modifier les chemins d'écoulement des eaux infiltrées depuis la paroi et accroître le risque d'inondation de la plateforme. Ce risque est accru d'autant que ces concrétions peuvent s'étendre aux couvercles de caniveaux créant une surface quasi étanche pouvant diriger les eaux de la surface vers la plateforme.

Pour l'industriel le colmatage des drains induit donc des conséquences en cascade. Nous proposons de considérer les enjeux industriels à trois niveaux (Figure 14):

1. le processus d'entartrage lui-même,
2. ses conséquences sur le drainage et les ouvrages
3. les conséquences du dysfonctionnement du drainage sur la maintenance et l'exploitation ferroviaire.

### **3.2 Objectifs industriels**

En liaison avec ces enjeux, les objectifs industriels de cette recherche pour SNCF Réseau sont les suivants :

1. Décrire le processus de formation des carbonates de calcium dans l'environnement ferroviaire (à minima des LGV):
  - a. analyse du contexte environnemental et ferroviaire
  - b. analyse des matériaux constitutifs de l'infrastructure (granulats : ballast, dalles, sous couche, matériaux drainants, sol support) et de leur éventuelle influence sur la calcification des réseaux de drainage.
  - c. analyse des dépôts précipités (la nature des carbonates de calcium précipités, a-t-elle un rôle physique sur le développement de l'entartrage ou sur la texture des dépôts).

- d. analyse fine des processus hydrodynamiques et hydrogéochimiques du système de CD sur un site pilote afin de déterminer un jeu de paramètres servant à l'identification et la comparaison d'un autre CD colmaté.
  - e. modélisations thermodynamique et cinétique pour estimer la quantité de précipitation des dépôts carbonatés sous différentes conditions hydriques sur le site pilote afin d'anticiper le risque en phase projet et améliorer le programme de la maintenance (par exemple en optimisant la fréquence de curage).
2. Identifier des techniques et des cycles de maintenance adaptés pour les dispositifs existants. Cette tâche sera abordée ainsi:
- a. développement d'un protocole (matériel et méthode) pour permettre le diagnostic d'entartrage et sa prédiction (qualification et quantification) sur un site particulier.
  - b. identification des paramètres clés entrant en jeu dans l'efficacité ou la non efficacité de solutions techniques alternatives de réduction de l'entartrage: modification physique des dispositifs de drainage, techniques mécaniques ou chimiques, d'élimination ou de dissolution ou d'inhibition du tartre.
  - c. travailler sur la recherche et la proposition de techniques curatives opérationnelles d'un cas d'étude à partir de ces paramètres et modèles de calculs.
3. Proposer un outil conceptuel pour l'estimation du risque d'entartrage sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage du réseau ferroviaire
- a. description des principes d'un outil à double fonctions d'étude pour l'aide à la décision au niveau préventif et curatif afin de prendre en compte le risque dès la phase amont des études (2.a), puis de l'exploitation (2.b) jusqu'à la dépose de l'ouvrage.

- b. proposition de pistes d'adaptation des référentiels pour la prise en compte du risque d'entartrage et sa limitation, afin d'adapter les tracés et/ou les dispositifs de drainage ou encore le système plateforme/drainage (géométrie, choix des matériaux).

Le développement industriel est donc axé sur un objectif d'amélioration des conditions de maintenance permettant d'optimiser l'entretien des réseaux existants, problématique principale aujourd'hui pour la SNCF. Le second axe, l'aspect conception permettra, lui, le développement de nouvelles pratiques et d'un nouveau produit pour les futurs travaux de conception / régénération.

### **3.3 Objectif scientifique**

La recherche menée vise à contribuer à l'apport de premiers éléments de réponse aux objectifs industriels décrits ci-avant. Elle doit permettre une meilleure connaissance des processus de formation de l'entartrage par précipitation de carbonates de calcium dans les systèmes drainants. Elle doit contribuer à en prédire la quantité et la cinétique de précipitation. Ceci est fondamental pour déterminer dès la phase amont des projets le risque d'entartrage et le cas échéant, la vitesse de colmatage des réseaux de drainage afin d'adapter la conception et d'optimiser les travaux de maintenance, permettant ainsi d'offrir une meilleure qualité de service, tout en réduisant les coûts de fonctionnement.

D'après les éléments bibliographiques présentés dans le chapitre 2 (§ 2.1.2), l'orientation pressentie de l'étude en première approche concerne l'aspect thermodynamique et cinétique d'une eau calco-carbonique dans les conditions hors équilibre. Dans le cas qui concerne l'environnement ferroviaire l'hypothèse est faite que la précipitation des minéraux carbonatés se produit surtout dans les eaux surfaciques de faible force ionique ( $I < 0.5M$ ) sous les conditions de température et de pression ambiantes avec une vitesse empiriquement rapide : vitesse équivalent à celle de la formation d'un travertin. Cette vitesse de précipitation de la calcite dépend théoriquement du degré de saturation ( $\Omega$ ) et de la surface solide en contact.

D'ailleurs, de par sa fonctionnalité un drain profond est mis en œuvre en sous-sol que ce soit le long de la voie ou dans un tunnel: l'infiltration dans le sol support ou l'encaissant joue sans doute un rôle. Donc, on émet le postulat que le problème du colmatage d'un drain ferroviaire est aussi une question de fonctionnement physique et chimique du bassin versant en amont (les sols). En théorie, dans les contextes karstiques où l'on observe des phénomènes similaires, l'eau se charge en ions calcium et hydrogénocarbonates via la dissolution de matériaux pendant son

parcours souterrain dans un encaissant carbonaté, puis la calcite re-précipite lorsque les équilibres physico-chimiques sont modifiés. Dans le contexte ferroviaire, la dynamique hydrogéochimique quoique présentant des similitudes se déroule à une échelle temporelle beaucoup plus brève et très locale spatialement.

En résumé, pour améliorer la compréhension des processus dans leur ensemble : fonctionnement hydro-physico-chimique du bassin versant amont et dans le système de drainage, il est nécessaire de répondre aux trois questions principales suivantes :

- Quel est le système à considérer pour analyser le phénomène de précipitation des carbonates de calcium dans l'environnement ferroviaire ?
- Quels sont les processus à prendre en compte et comment les quantifier ?
- Quels sont les facteurs externes et internes au système considéré qui conditionnent la précipitation de carbonates de calcium. En particulier, quels sont les catalyseurs et inhibiteurs potentiels présents dans l'environnement ferroviaire ?

### **3.4 Démarche scientifique au service des objectifs industriels**

La Figure 14 présente le logigramme synthétique de la démarche scientifique mise en œuvre pour la résolution de la problématique industrielle au regard de l'arbre des conséquences de l'entartrage du système sur l'exploitation.

La démarche globale porte donc sur un axe principal qui est la compréhension des phénomènes qui est un apport essentiel pour alimenter les deux autres auxquels nous apporterons un éclairage et des pistes dans ce travail :

- la compréhension de la problématique : Le fonctionnement du BV en amont, processus physiques (origine d'eau) et chimiques (source de calcaires);
- la prédiction : du risque d'entartrage du drain et de la proposition de solution opérationnelle en différents contextes de sites (tunnel ou LGV). : quantité (thermodynamique) et vitesse (cinétique) de la formation des carbonates de calcium dans les ouvrages engendrant la présence d'eau dans la plateforme par dysfonctionnement du drain ;

- l'aide à la décision : aide au diagnostic (identification de typologies de cas et comparaison entre les cas), aide à la prédiction (risque de colmatage et quantité de dépôts), aide à la recherche de solutions opérationnelles (préventives en conception /régénération et curatives pour l'existant).

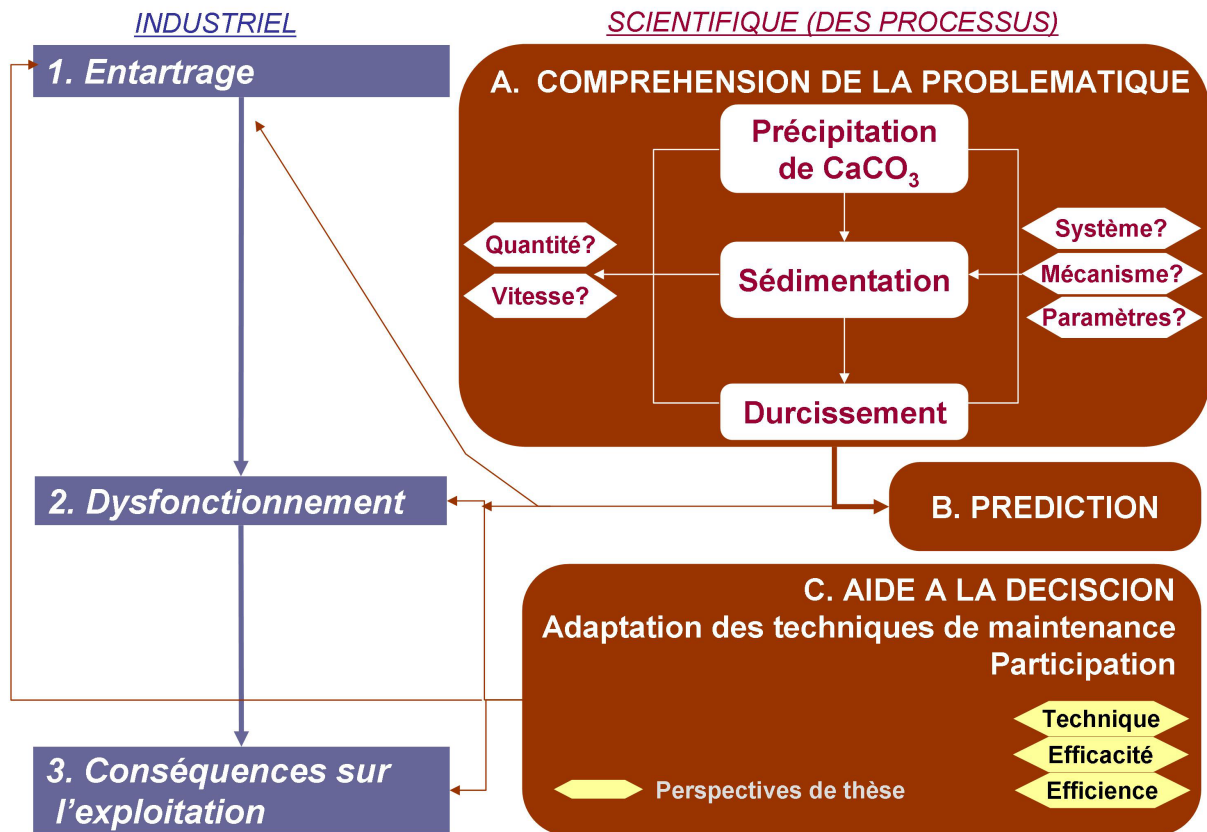


Figure 14: Conséquences de l'entartrage des drainages et synthèse des études menées dans la thèse en support des enjeux industriels

### 3.5 Démarche de la thèse

La démarche de thèse mise en place repose sur une double approche expérimentale et de modélisation.

#### 3.5.1 Approche expérimentale

Les échelles spatiales et les échelles temporelles relatives au fonctionnement des systèmes de drainage ferroviaires sont petites : l'échelle spatiale caractéristique est de l'ordre de quelques centaines de mètres entre l'amont et l'exutoire d'un dispositif de drainage ; l'échelle de temps sur laquelle un évènement pluvieux s'évacue ne

dépasse pas quelques heures *a priori*. Analyser le fonctionnement d'un système de drainage ferroviaire implique donc de concevoir un système expérimental adapté à ces petites échelles spatiales et temporelles.

Par contre, il n'est pas envisageable, à la fois pour des raisons logistiques et budgétaires de multiplier ce type de système expérimental sur un nombre de cas permettant de couvrir l'ensemble des configurations existantes sur le réseau ferroviaire national français.

Par conséquent une double approche est proposée. Elle couple une étude locale permettant une appréhension fine des processus (site pilote) complétée par une campagne d'observation et d'analyse de base de plusieurs sites complémentaires (sites flashes) dans le but de mettre en évidence des principes généraux de facteurs favorisant la précipitation de carbonates de calcium dans les infrastructures ferroviaires.

Sur le site pilote, les mécanismes (processus et causes) liés à la précipitation de calcite sont analysés via 3 moyens : une acquisition automatique du suivi de terrain en continu par l'installation des capteurs physico-chimiques ; des campagnes de mesures mensuelles permettant l'analyse de l'état thermodynamique du système et de la cinétique de formation de la calcite.

Les sites flashes ont fait l'objet d'une campagne de terrain unique pour la caractérisation du site et la détermination de l'état thermodynamique de l'eau en s'appuyant sur des prélèvements et analyse des dépôts carbonatés et de l'eau drainée.

### **3.5.2 Approche par modélisation**

Sur le site pilote, compte tenu de la complexité du système étudié, la modélisation permet de fournir un cadre d'interprétation globale de l'ensemble des données récoltées. Elle permet également de proposer et valider une représentation conceptuelle du fonctionnement du système de drainage étudié. L'approche expérimentale permet de constituer une base de données d'entrée pour cette démarche.

Sur les sites flashes, les données obtenues, en complément des données du site pilote, permettent l'élaboration d'arbre de décision permettant de choisir en préventif, l'optimisation de la conception du système de drainage, en curatif, la technique de traitement à mettre en place.

### 3.6 Définition du système de drainage ferroviaire

Dans tous ces cas d'études (sites pilote et flashes), le système étudié est un « système du drainage ferroviaire» (Figure 15, cas d'un CD) qui inclue deux sous-systèmes couplés : le sous-système constitué par le « bassin versant » (sol et sous-sol) drainé par le système de drainage (sous système « bassin versant ») et le sous système constitué par le dispositif lui-même (sous-système « dispositif »).

Le comportement de ce second sous-système dépend du comportement du premier. Par contre tant que le colmatage n'est pas total et que l'eau ne stagne pas dans le « bassin versant » il n'y a pas de rétroaction du « dispositif » sur le « bassin versant ».

Ce système est multi milieux, il inclut entre autres le sol d'origine, le sol multicouches mis en place lors de la construction la ligne, le dispositif de drainage. Il est également multiphasique (phase solide constituée des sols et des précipités, phase liquide constituée par l'eau d'origine météorique et potentiellement celle de ou des nappe(s), phase gazeuse constituée par l'atmosphère locale). Il peut également être considéré comme la combinaison d'un sous-système physique dominant décrivant la dynamique de l'écoulement des eaux et d'un sous-système dominé décrivant l'ensemble des interactions physico-chimiques. Ne sont pas prises en compte dans le fonctionnement du système les interactions impliquant des organismes vivants.

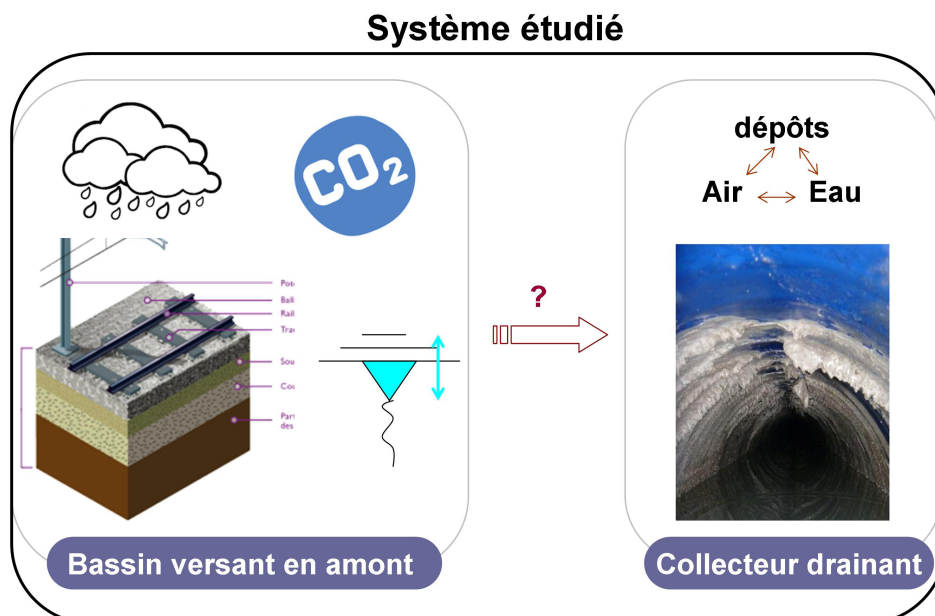


Figure 15: Diagramme du système de Collecteur Drainant

Dans chaque sous-système, la nature des éléments constitutifs et leurs interactions doivent être étudiées. Des plus, les interactions entre les deux types de sous-systèmes (« bassin versant » et « dispositif » d'une part, physique et physico-chimique d'autre part) doivent être identifiées. Dans le sous-système « bassin versant » il faut répondre à la question de l'origine et de la dynamique de l'eau in situ au point de vue physique et chimique ; dans le sous-système « dispositif », les dépôts précipités doivent être déterminés, puis l'évolution de l'eau présente en fonction des forçages extérieurs, en particulier la pluviométrie.

Les variables d'état du sous-système physique à prendre en compte sont les niveaux des nappes et le débit dans le « dispositif ». Le sous-système physico-chimique peut être entièrement déterminé par les variables, température, pH, dureté,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_2$  dans l'eau et dans l'atmosphère.

### **3.7 Un site pilote et 8 sites flashes**

Vis-à-vis des deux grandes questions scientifiques posées par la thèse: causes et processus général de formation de l'entartrage d'un drain par précipitation de dépôts carbonatés, le choix d'une stratégie d'expérimentation sur un site pilote instrumenté nécessite une démarche sur le long terme complétée par un nombre conséquent de sites complémentaires répartis spatialement afin d'obtenir des résultats statistiques fiables. Au cours de la thèse, le site pilote a été suivi pendant 24 mois. Une campagne de 8 mois a été nécessaire pour la visite et les expérimentations relatives à l'étude des 8 sites flashes complémentaires visités. Leurs localisations géographiques sont illustrées dans la figure suivante (Figure 16).

#### **3.7.1 Choix d'un site pilote : Chauconin**

Le site pilote se devait être un système aussi simple que possible à comprendre afin de nous permettre de suivre l'évolution du phénomène et de l'interpréter.

Dans ce cadre, dans un premier temps un sous-système « dispositif » de type Collecteur Drainant (CD) de LGV est considéré pour les deux raisons suivantes :

- la géométrie et l'installation sont standards ce qui offre une base de paramètres comparables entre sites;
- des linéaires importants entartrés existent dans des contextes géologiques différents.



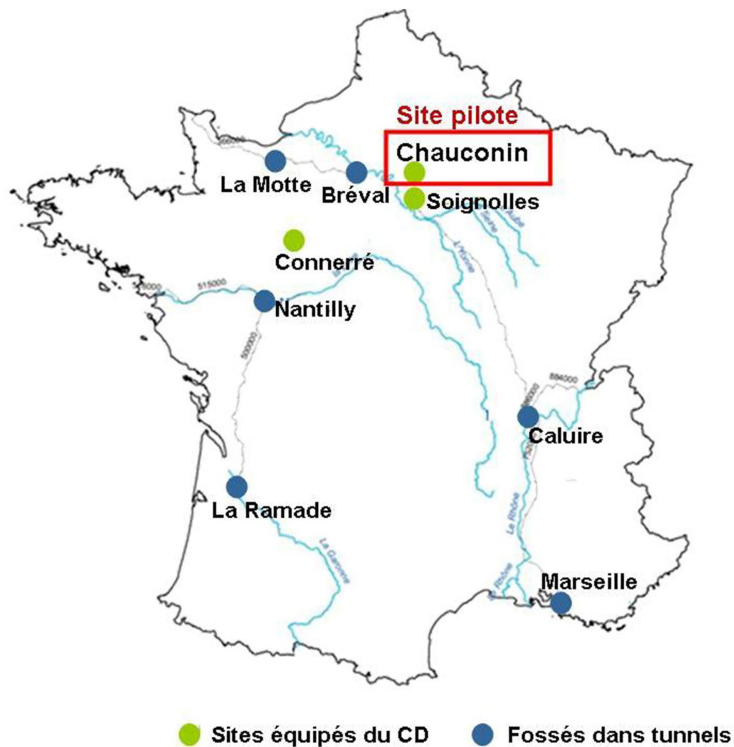


Figure 16 : Situation géographique des sites testés – Un site pilote et 8 sites flashes

Par ailleurs :

- Le site doit être équipé d'un dispositif de drainage profond sur lequel le colmatage des fentes du CD et plus généralement du caniveau drainant a été constaté à plusieurs reprises ;
- Le site doit être sur une Ligne à Grande Vitesse (LGV) compte tenu de l'importance de la tenue de la voie au passage des trains, des enjeux économiques et de sécurité ;
- Le fonctionnement de l'hydrodynamique du système de CD doit être le plus simple possible pour nous permettre de comprendre les processus physico-chimiques et de les quantifier.
- Le système doit aussi nous laisser la possibilité d'étudier l'influence des travaux de mise en place de la voie;
- Le site doit être à proximité du laboratoire et facilement accessible pour permettre des allers-retours réguliers, faciliter un suivi mensuel;

- Le site doit permettre l'installation aisée et la maintenance de l'ensemble des capteurs nécessaires à l'expérimentation ainsi que le prélèvement d'échantillon d'eau et de sols;

Afin d'identifier un site satisfaisant à l'ensemble de ces critères, on a mené une enquête au début de la thèse en 2013 auprès des Infrapôles LGV (établissements en charge de la maintenance opérationnelle) des LN1 à LN6 soit sur les 4000 km du réseau LGV français à date. Elle portait notamment sur le linéaire de CD entarté, les informations du contexte de site et les cycles et coûts de maintenance.

D'après cette enquête, nous avons estimé à au moins 550 km le linéaire de voies LGV équipé de CD dont une cinquantaine de kilomètres entartés pour l'ensemble de 6 LGV existantes.

A proximité de Paris, une trentaine de kilomètres de CD entartés ont été identifiés, dont un tiers se situant à moins de 50km de Paris (16 sites). Parmi ces 16 sites, 8 sites présentaient un linéaire de CD d'environ un kilomètre : Chauconin (LN6, entre PK 19 et 20), Soignolles (Interconnexion, entre PK 30 et 31) et 6 autres sites (5 sur LN2 et 1 sur l'interconnexion).

Parmi ces 8 sites, nous avons retenu le site de Chauconin (présentation détaillée du site dans le chapitre 4) pour les critères suivants :

- proximité du site : à environ quarante kilomètres de Paris
- portail d'accès à proximité immédiate du site.
- bassin versant limité et assez bien défini. Les échanges avec les nappes phréatiques sont a priori également limités. Le caniveau drainant recueille les eaux d'une plateforme ferroviaire et également les eaux de voies de service situées à proximité.
- géologie plutôt simple et homogène dans l'ensemble du secteur du CD : des travaux préliminaires (SNCF, 2003) ont montré que les premiers 8 mètres de sol se composent successivement de limons sur du Calcaire de Saint Ouen (CSO) sous-jacent.
- une particularité : un sol traité à la chaux.
- facilité d'instrumentation, en raison de la présence d'une grande plateforme ferroviaire de service. Des regards d'accès sont présents tous les 80m environ.

- possibilité de réaliser des comparaisons avec d'autres types de dispositifs de drainage (FBPB/CD/FTR/FT) présents en amont proche du site dans un contexte similaire.

### **3.7.2 Choix des sites flashes**

L'étude des sites flashes doit permettre de répondre à deux objectifs principaux : fournir une base de comparaison avec le site pilote ; et permettre la généralisation des résultats en tenant compte de configurations et de dispositifs variés. Les critères retenus pour le choix d'un site flash sont les suivants :

- entartrage avéré sur le site
- situation prioritairement en LGV et en tunnel
- l'échantillon doit permettre de couvrir un maximum de combinaisons (type de géologie, type dispositif de drainage)

Deux sites flashes sont situés en pleine voie LGV et équipés d'un CD : Soignolles et Connerré.

Six sites flash se situent en tunnels (Figure 16): Breval, Nantilly, La Motte, La Ramade et Caluire (Rousse, 2015) .

## **3.8 Epilogue du chapitre**

En résumé, la démarche de la thèse est construite de manière à répondre aux trois niveaux d'enjeux industriels (Figure 14):

- de connaissance du mécanisme de l'entartrage et de ses conséquences,
- d'identification de solution opérationnelle selon les axes préventif et curatif,
- et de proposition d'un outil conceptuel d'aide à la décision,

Au travers de la réponse aux enjeux scientifiques qui sont :

- analyse des processus (sources de calcaire et dynamique du système) ;

- détermination des causes (facteur aggravants) ;
- simulation de la quantité et de la vitesse des dépôts précipités ;

La compréhension des processus est appréhendée au travers d'études expérimentales de 9 sites, dont un site pilote principal instrumenté sur la LGV Est (Chauconin). Le contexte, les méthodes, les matériels instrumentaux et expérimentaux sont détaillés respectivement dans les chapitres 4 et 5 pour le site pilote, et dans les chapitres 4 et 6 pour les 8 sites flash.

L'approche thermodynamique (quantité) et cinétique (vitesse) de formation de la calcite le long du CD de Chauconin réalisée à partir des données issues des campagnes saisonnières d'analyses d'eau et dépôts est présentée dans le chapitre 6 et 7.

L'ensemble de ces résultats contribue à développer un modèle conceptuel présenté dans les chapitres 8 et 9 applicable au cas de Chauconin (un système de CD) dans un premier temps, avec la perspective d'une adaptation aux autres types de drainages ferroviaires (caniveaux de tunnels).

Ces résultats permettent également d'identifier un jeu de paramètres prioritaires contribuant à la formation de la calcite dans divers contextes ferroviaires. Dans le chapitre 10, nous en proposons un classement selon le degré de contribution au phénomène d'entartrage. Enfin, on présente les principes d'un outil d'aide à la décision dont ces paramètres constituent les données d'entrées nécessaires. Cet outil vise à faciliter la prise en compte du risque « entartrage sur le RFN » de l'étape du diagnostic à celle de la proposition de la solution opérationnelle relative au contexte du site et à son exploitation.



## Chapitre4 Présentation du site pilote – Chauconin (77)

### 4.1 Localisation géographique

Le site de Chauconin (Figure 17) choisi comme site pilote de cette recherche, est situé près de la ville de Meaux dans le département de Seine et Marne, à 40 km au nord-est de Paris. Deux ruisseaux traversent le site : le Ru de la Sorcière et le Ru des Touches. Ces deux rus rejoignent La Marne en aval de la ville de Meaux.



Figure 17: Localisation du site pilote -Chauconin (77)

### 4.2 Contexte naturel

#### 4.2.1 Hydrologie

Le bassin versant naturel (BV) dans cette zone est drainé par deux petits rus (le Ru de la Sorcière et le Ru des Touches) traversant la ligne à grande vitesse : du nord vers le sud jusqu'à la Marne (Figure 17). La conception hydraulique du Lot 12 Tronçon A de la LGV Est (entre le Pk 17 et PK 20) recense les différents BV qui encadrent la ligne avant terrassement. La surface de bassin versant naturel traversé

par le tronçon étudié (4 km) est estimée à 16 km<sup>2</sup> (Figure 18 : Bassin versant naturel sur le site de Chauconin) **avant les terrassements de déblais et de remblai**. La moyenne des précipitations annuelles (mm) de pluie se situe dans la tranche de 500 – 700 mm (donnée MétéoFrance).

Le ruissellement sur le site de Chauconin est de type écoulement diffus. Selon le SETRA, la vitesse de ruissellement est estimée à 0.1m/s sur une pente de terrain qui est 0.007m/m dans la zone.

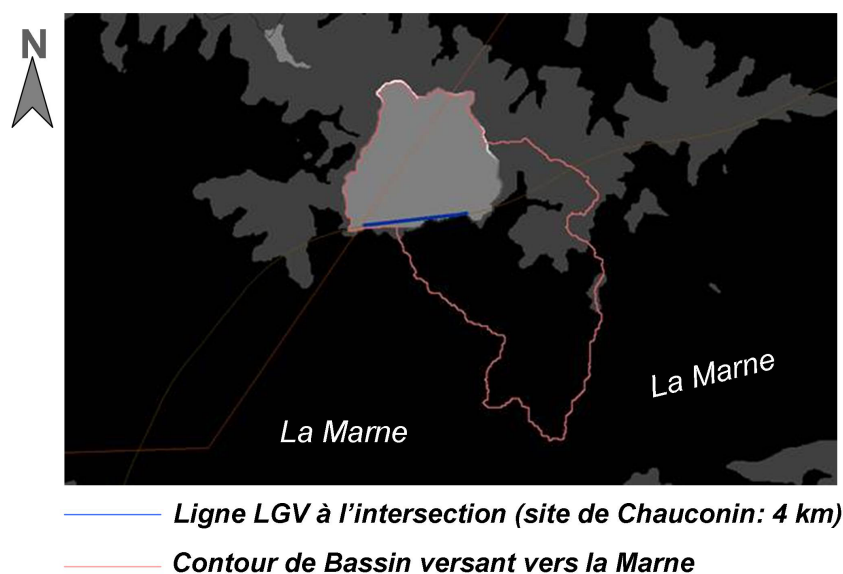


Figure 18 : Bassin versant naturel sur le site de Chauconin – carte réalisée dans le logiciel IRIP (Dehotin et al., 2015)

#### 4.2.2 Géologie

Le site de Chauconin se trouve dans le Bassin Parisien dont la géologie est assez bien connue (Figure 19a).

L'étude de la géologie du site a été réalisée selon deux échelles distinctes : de régionale vers locale. A l'échelle régionale, divers documents bibliographiques sont disponibles (CDG EXPRESS, 2002; Pasquet and Legrand, 1967) en complément de la carte géologique du BRGM et de sa notice (BRGM 0155N, 1978). A l'échelle locale (la LGV Est, lot 12, tronçon A), nous exploitons les dossiers d'étude de sol faits pour la conception de la ligne (LGV Est -DOE, 2003) et les rapports de stages internes de SNCF Réseau (Conso, 2013b; Maraghni, 2011). Enfin des sondages géotechniques complémentaires ont été réalisés au début de ce travail pour vérifier et préciser la géologie locale au niveau du collecteur étudié. Le Tableau 15







## a) Formations géologiques

Le territoire de Meaux (BRGM 0155N, 1978) est traversé par deux grandes vallées : celle de la Marne sensiblement est-ouest, aux méandres encaissés, bordant le sud de ce territoire et celle de son affluent l'Ourcq coupant par le milieu le territoire du Nord-est au Sud-ouest.

Tableau 15 : Synthèse des sondages effectués entre les PK 17 et 20 de la LGV Est depuis 2003

Type	nombres	position	zone	Profondeur maximale en m	Année
Pelles mécaniques	60	Axe de Tracé	PK 17 à 20	8	2003
Carrotages	7	Axe des voies	PK 17 à 20	8	2003
Carrotages	3	Crête de déblai et axe de plateforme ferroviaire	PK 19 à 20	8	2013
Tarrières	2	Crête de déblai	PK 17 à 20	8	2013

Les formations géologiques de la zone sont d'âge tertiaires et quaternaires n'ayant pas subi de déformations tectoniques (CDG EXPRESS, 2002; Pasquet and Legrand, 1967). Elles peuvent être considérées comme subhorizontales à notre échelle d'étude. La succession des formations est la suivante :

- Limons des Plateaux : cette formation couvre la surface autour du tronçon étudié ;
- Sables de Monceau : cette formation se trouve à l'affleurement au sud du site étudié ;
- Calcaires de Saint Ouen (CSO) : cette formation se situe à l'affleurement à l'aval des deux ruisseaux traversés par la ligne ferroviaire;
- Marnes supra-gypseuses (Côté de la ville de Montyon, Figure 19) : Cette formation affleure (BRGM 0154N, 1978) au Nord-est du site étudié ;

Les formations superficielles qui affleurent au droit du site de Chauconin sont uniquement les Limons des plateaux. Autour du PK 19+100 en direction du sud-est, les formations calcaires sont exposées à la surface. D'après les sondages effectués

en 2003 (LGV Est - DOE, 2003) et en 2013, cette formation est le calcaire de Saint Ouen qui est juste à 1m de profondeur sous les Limons des Plateaux autour du PK 19+100.

Les caractéristiques des formations étudiées sont les suivantes :

- Limon des plateaux (LP) : ils sont formés de matériaux fins, argileux et siliceux. Développés sur les plateaux où ils peuvent atteindre une épaisseur de 6 m et peut-être plus, ils s'étalent aussi largement sur les versants exposés au Nord ou à l'Est, soulignant ainsi la dissymétrie des vallées (diminution de l'épaisseur de cette couche de sol au niveau des vallées). « Au point de vue granulométrique, les «limons» sont caractérisés par une prédominance de la fraction inférieure à 50µm qui représente 90 %. Au point de vue chimique, la silice prédomine, 75 %, sous forme de quartz, le fer et l'alumine étant de l'ordre de 10 %. La teneur en calcaire est toujours faible » (BRGM 0154N, 1978). Cette couche de sol présente une faible perméabilité, mais peut présenter des circulations d'eau.

- Calcaire de Saint Ouen (CSO): C'est une formation carbonatée blanchâtre à grisâtre légèrement rosée formée par une alternance irrégulière de marnes et de calcaires. La puissance de cette formation, assez constante sur l'ensemble de la feuille, est de l'ordre d'une dizaine de mètres. Les marnes sont plus développées à la base où elles atteignent 4 à 5 m. L'hétérogénéité et la texture fracturée de cette formation calcaire marneuse permet l'établissement d'une nappe régionale (nappe du Calcaire Saint-Ouen (BRGM 0154N, 1978).

#### b) Profil géologique au droit du tronçon étudié

Les sondages géotechniques effectués en 2003 le long de la voie entre les Pk 17 et 20 ont permis d'établir le profil des formations des 8 premiers mètres de profondeur (Figure 20), ainsi que d'identifier la présence de niveaux d'eau. Les échantillons des sols prélevés ont été analysés au laboratoire.

D'après les sondages effectués le long de la voie ferrée en 2003, on sait que le terrain naturel est vallonné au droit de la ligne de Paris vers Strasbourg. Le profil de la formation des Limons des Plateaux en surface suit cette topographie donnée par le Calcaire de Saint-Ouen (marneux, fracturé, couleur beige) dans lequel sont creusées les vallées et dont la présence est cohérente avec la notice du BRGM à l'échelle de toute la commune de Chauconin. L'épaisseur de limon en moyenne de 4 ~ 5 m se réduit à 1 ~ 2 m vers le Pk 19. Les cinq sondages effectués en 2013 confirment la présence d'une couche de limons d'épaisseur de 3 à 4 m entre le PK 17+ 425 et le PK 19+ 420 suivie par la formation de calcaire marneuse. La variation latérale d'épaisseur de la couche de limons de 5 à 2 m n'a pas pu être captée via ces cinq sondages ponctuels.

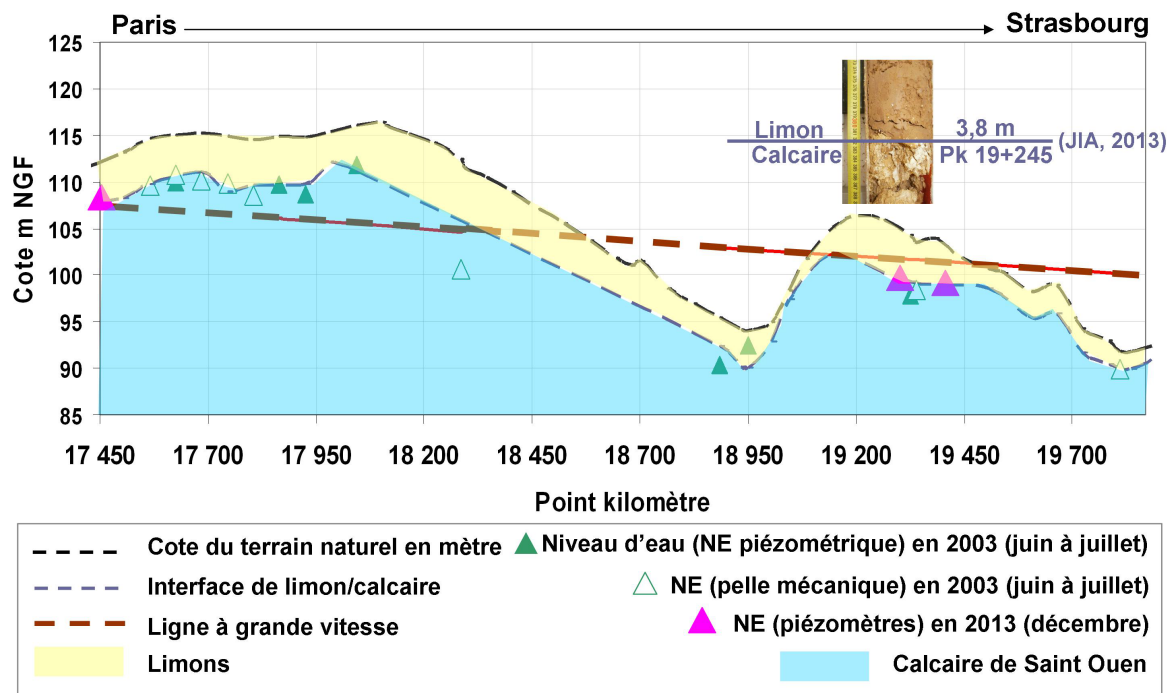


Figure 20 : Profil géologique/hydrogéologique – Chauconin (77) obtenu à partir des sondages géotechniques (2003,2013)

En résumé, d’après l’ensemble des sondages réalisés en 2003 et 2013 (Figure 20), les formations présentes sur les premiers huit mètres sont les limons des Plateaux et le Calcaire de Saint-Ouen. D’après les analyses au laboratoire, le limon est classifié de type A3 sur la classification GTR, et le calcaire est marneux. Ces résultats sont confirmés par les sondages effectués dans la même zone en 2013. Les détails des sondages de 2013 sont décrits dans le chapitre 6 – résultat.

#### 4.2.3 Hydrogéologie

La notice géologique (BRGM 0155N, 1978), ne renseigne pas sur les nappes superficielles locales éventuelles de Chauconin. La première nappe décrite dans la notice est la nappe artésienne des sables du Cuisien (BRGM 0155N, 1978) à plus d’une trentaine de mètres de profondeur qui ne concerne pas notre étude car elle est située à au moins vingt mètres de profondeur par rapport au réseau de drainage de la LGV.

Par contre, les sondages réalisés tous les 50 m le long de l’axe des voies entre le PK 17 et le PK 20 réalisés l’été 2003 (LGV Est - DOE, 2003) ont montré la présence d’un niveau piézométrique qui atteint le toit de la couche de Calcaire de Saint-

Ouen à 3 à 5 m de profondeur sous le terrain naturel environ. À certains endroits, souvent par diminution de l'épaisseur de limons, ce niveau piézométrique peut atteindre la surface. Il est possible de le rencontrer à environ un mètre sous le terrain naturel. Cette zone saturée de surface est fortement influencée par les conditions météorologiques.

La présence d'une zone saturée au toit du Calcaire de Saint-Ouen est confirmée par les mesures réalisées dans les piézomètres posés en 2013 (Figure 20). Cette eau perchée à la surface est alimentée directement par les eaux météoriques et est drainée par les deux ruisseaux de part et d'autre du tronçon, ce que soulignent les mesures réalisées en 2003 lors de la première campagne géotechnique (PK 17 au PK20, Figure 20). Elle présente des variations saisonnières confirmées par les suivis piézométriques réalisés depuis 2013 (Chapitre 6, § 6.1.6).

En considérant l'épaisseur de limons aux différents PK, on remarque que cette nappe n'est pas impactée par le bassin versant ferroviaire au PK 17, mais l'est potentiellement dans la zone du PK 19 à 20 ce qui est confirmé par les différentes dynamiques relevées par les piézomètres (Chapitre 6, § 6.1.6).

## **4.3 Contexte ferroviaire**

### **4.3.1 Tracé de la ligne LGV**

Dans ce terrain vallonné, le tronçon est constitué d'une alternance de remblais et de déblais réalisés entre 2003 et 2005 (Figure 20) de manière à maintenir la pente de la ligne (0,3%).

Le site est constitué de :

- deux voies principales à circulation commerciale circulant dans les deux sens sur 300 km entre Paris et Strasbourg avec : voie 1 de Paris vers Strasbourg et voie 2 dans le sens inverse. La vitesse maximale autorisée est de 320km/h sur cette ligne.

- trois voies de services (voie 6, 8 et 10) situées entre le pk19 200 et le pk19 750. Elles permettent le stationnement de trains travaux ou le garage provisoire de TGV pour régulation.

Les voies principales et de service sont ballastées à l'exception d'une portion des voies principales réalisée sur dalle béton entre les PK 18 612 et PK 20 455. Il s'agit d'une zone test pour ce dispositif de voie sur dalle béton qui peut représenter une alternative à la voie sur ballast. De manière générale, l'emploi de ce type de

plateforme modifie la gestion des écoulements surfaciques de la plateforme ferroviaire : de 85% vers 100% de la pluie nette.

#### 4.3.2 Plateforme ferroviaire

Après le terrassement de la ligne, afin de maintenir le nivellement de la plateforme ferroviaire le terrain naturel est terrassé (déblai) ou remblayé (remblai) (Figure 20). Le dispositif de drainage étudié se situe entre le déblai 503 et le remblai 506. La numérotation des ouvrages de terrassement provient de la construction de la ligne.

- déblai 503 du pk 16 500 au pk 18 620 ;
- remblai 504 du pk 18 620 au 19 140 ;
- déblai 505 du pk 19 140 au pk 19 520 ;
- remblai 506 du pk 19 520 au pk 20 060.

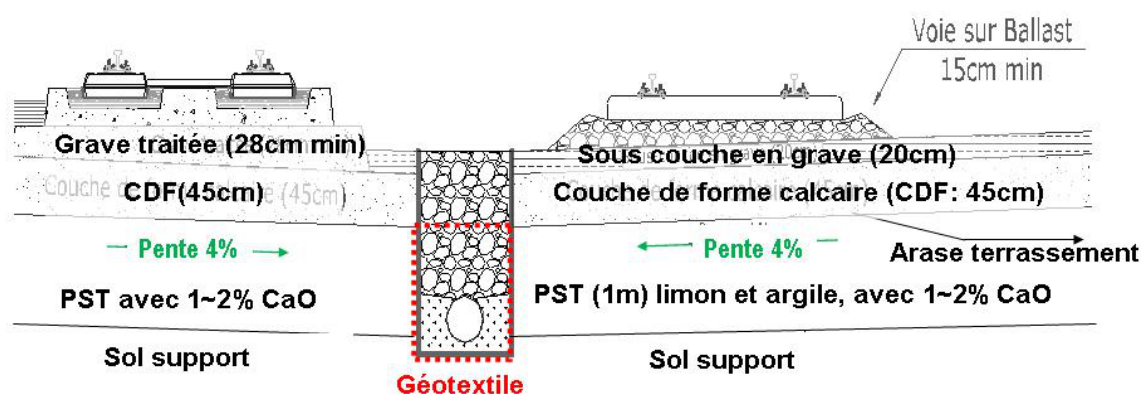


Figure 21: Coupe transversale de la plateforme ferroviaire – Chauconin, déblai 505

Les déblais (503 et 505) qui concernent l'étude recoupent les Limons des Plateaux et le Calcaire de Saint-Ouen, et les remblais (504 et 506) sont constitués de limons purgés et traités du fait de leurs faibles caractéristiques mécaniques pour améliorer la portance de la plateforme. Ici on rappelle que la plateforme LGV se compose de deux parties : structure d'assise (sous couche plus couche de forme) et partie supérieure des terrassements (PST). Selon le type de voie choisi, son dimensionnement varie (SNCF, 1996a). Le dimensionnement de la plateforme au droit de la zone étudiée (déblai 503 au remblai 506), respecte les spécifications

techniques de l'IN3278 (SNCF, 2006). La Figure 21 présente la coupe transversale de la plateforme et du dispositif de drainage au niveau du déblai 505.

La voie sur dalle en béton se situe sur une couche de grave traitée. La portance est assurée par la couche de forme (CDF = fondation) rapportée, et la couche de sol traité à la chaux (PST : partie supérieur de terrassement = arase), qui s'appuie sur le sol support in situ. Leurs caractéristiques sont les suivantes, d'après la notice de construction de la LGV (SNCF, 2006):

- Dalle en béton : béton armé, dosage entre 350 kg/m<sup>3</sup> et 370 kg/m<sup>3</sup> ; Granulométrie 0/20 max ; Composition : 80% de CaCO<sub>3</sub> et de 20% d'argiles (SiO<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ; Protection vis-à-vis de l'alcali réaction ; Etanchéité assurée par une couche de 2mm de résine de polyuréthane.
- Grave traitée (>28cm) : Directement sous la dalle béton ; Soutenue par la grave ciment de granularité de 0/14 type 3 pour une portance est de 100 MPa en moyenne.
- CDF rapportée (45cm) : Calcaire Concassé 0/31.5 ; 4,5% fines (< 40 µm) ; 26% >20mm ; Densité de 2,432 g/cm ; Compacité>95%.
- PST (1m): Au niveau du déblai des 505 au droit de larase terrassement on a un soupçon de présence de gypse doù une purge de larase terrassement (AT) sur 1m (LGV Est - DOE, 2003) ; Limons A2 et Argiles A3 des DBT 505 et 507 traités de 1% à 2% de CaO concernant le déblai 505 pour une portance de 140 MPa en moyenne.
- La couche de sol support in situ : toit du Calcaire (CSO).

La voie ballastée est constituée ainsi : couche de ballast, sous-couche, CDF rapportée, PST et sol support in situ. Ses caractéristiques sont les suivantes d'après la notice de construction de la LGV (SNCF, 2006) :

- Ballast (>0,15m) : C'est le lit de granulats qui supporte la voie de chemin de fer. Son pourcentage de fines est faible (0,5% de passant à 630µm) mais mobilisable. Il est constitué de roches volcaniques.
- Sous-couche (>20cm) : La sous couche est un élément de la structure d'assise constituée d'une couche de matériaux grenus, insensibles à l'eau et intercalés

entre la couche de forme et le ballast. Il s'agit de grave 0/31.5 bien graduée pour une portance de 100MPa en moyenne.

- Les matériaux utilisés sont identiques du côté voie sur dalle et côté voie ballastée pour les deux autres couches : CDF rapportée et PST.

Deux sondages carottés ont été effectués en décembre 2013 dans la plateforme de la voie de service afin de caractériser les matériaux après 7 ans d'exploitation de la ligne. Les résultats des observations et des analyses au laboratoire soulignent des incohérences avec les spécifications du référentiel IN0260 (en 2003) et IN3278 (en 2006) pour la sous couche et la CDF sous la voie de service :

- La sous couche et la CDF du côté de la voie de service ont été mises en place avec les mêmes matériaux rapportés; les caractéristiques de ces matériaux seront discutées dans le chapitre 6 – (§ 6.1.1).

- L'épaisseur de la CDF est de 70 cm au lieu des 45 cm comme indiqué dans la Figure 21.

Cette incohérence entre le code de construction et la construction in situ laisse un doute sur l'homogénéité de la plateforme après la construction. Le coefficient de ruissellement (0,85 en théorique) réel de la plateforme ferroviaire doit être mis en question.

### **4.3.3 Bassin versant au droit de la voie**

Le terrassement de la plateforme ferroviaire, a modifié les caractéristiques du bassin versant (BV). La Figure 18 schématise la configuration du BV naturel avant le terrassement de la ligne. Le BV modifié localement après terrassement des déblais et remblais entre le PK 19 et 20 au niveau de l'axe de la voie est illustré dans la Figure 22a. Le BV autour de collecteur drainant après la réalisation des voies de circulation et de service dans la zone est illustré dans la Figure 22b.

La surface de BV naturel avant la construction de la LGV est estimée à 16 km<sup>2</sup> environ (§4.2.1). Ce BV naturel est drainé du nord vers le sud par les deux ruisseaux traversant la voie de TGV.

Après le terrassement du terrain, on identifie un bassin versant local entre les PK 19 et 20 dans lequel les ruissellements coulent vers l'axe de la voie dans les déblais. Dans la zone de remblais, les ruissellements sont évacués vers l'extérieur, de la voie de TGV (Figure 22b).

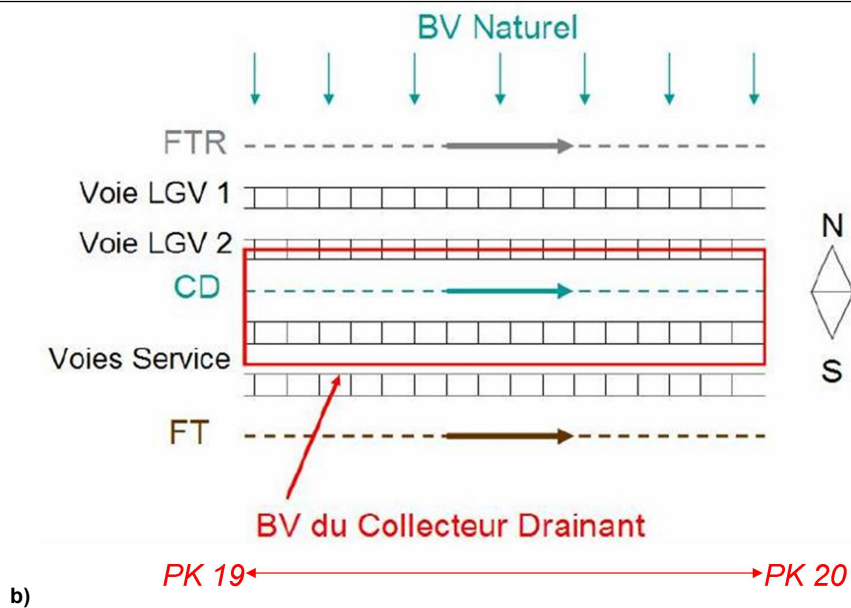
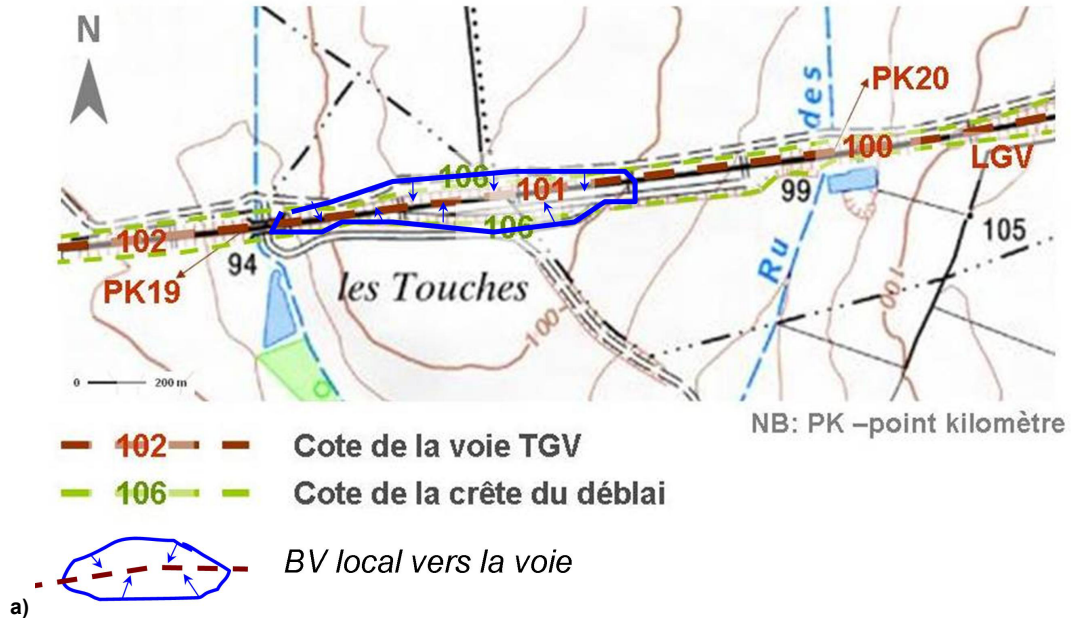


Figure 22: Schématisation des bassins versants naturel ( PK 17 à 21) et ferroviaire (PK 19 à 20)- Chauconin (77)  
 NB : a) Bassin Versant (BV) naturel avant le terrassement ; b) BV local après terrassement ; c) BV ferroviaire drainé par le CD

Cependant, après la construction de la voie entre le PK 19 et 20, dans la zone testée (déblai 503), on identifie un bassin versant naturel du côté V1. Ses eaux sont récupérées dans un fossé terre revêtu de béton (Figure 22c). Côté V2 et voie(s) de service, un BV ferroviaire lié au collecteur drainant (CD) est identifié.



La surface du bassin versant ferroviaire relatif au collecteur drainant étudié correspond à la surface dans laquelle toutes les eaux issues des précipitations sont rabattues vers l'exutoire du collecteur drainant. Sa largeur est définie entre le milieu de la voie V2 sur dalle et de la voie de service sur ballast (bassin versant ferroviaire : cadre rouge dans Figure 22c). D'après le levé topographique réalisé en Mars 2014 pour les besoins de l'étude, la surface de ce BV ferroviaire est estimée à 8600 m<sup>2</sup>.

#### **4.3.4 Drainage des eaux dans le bassin versant ferroviaire**

Les dispositifs de drainage comme la plateforme sont des composants de l'infrastructure ferroviaire (SNCF, 2007; SNCF, 1996b). Ils forment des réseaux longitudinaux et transversaux, et regroupent les fonctions de drainage ou de rabattement des eaux suivantes :

- i) les eaux de pluie qui s'écoulent dans les structures d'assise (bassin versant ferroviaire);
- ii) les eaux de ruissellement des talus ou des bassins versants naturels ;
- iii) les eaux internes éventuelles (nappes ou circulations sous-jacentes).

La Figure 23 présente le système de drainage mis en place sur le site de Chauconin au niveau de la voie 2 qui correspond à la zone du collecteur drainant étudié. Vu les problèmes de colmatage de CD liés à la précipitation de la calcite, on ignore le système de drainage de la voie 1 qui est un fossé terre revêtu en béton.

Les déblais 503 et 505 sont considérés comme des déblais humides au sens ferroviaire du terme (niveau piézométrique prévisible maximal de la nappe situé à moins de 2 m sous la cote de l'axe de la voie d'après le référentiel IN0260 (SNCF, 2003). Pour ces déblais, les dispositifs de drainage de la plateforme - dits dispositifs de drainage profond- sont calés à une profondeur qui permet le rabattement de la nappe phréatique à au moins 1,5m sous la voie. Le collecteur drainant (CD) ou le FBPB (fossé béton préfabriqué à barbacanes) présentent cette fonctionnalité (Figure 23).

Au pied du déblai 503, le FBPB (dimensionné pour une période de retour (Pr) égale à 10 ans) est posé le long de la voie pour drainer l'eau de talus et celle de la plateforme de la voie 2 (Figure 23), puis les rejeter dans un bassin de rétention (BRN1) au PK 18+400 au moyen d'un fossé terre (FT) qui est une fonction d'acheminement des eaux du FBPB.

Dans le même déblai 503, pour le reste du tronçon, le drainage longitudinal est effectué par collecteur drainant, (CD<sub>tronçon1</sub> ; Pr=10ans) coté voie 2. Ce CD assure la

récupération d'une partie des eaux de la plateforme. L'exutoire de ce tronçon de collecteur drainant (CD\_tronçon1) est connecté au fossé d'acheminement au niveau du pk 18 720.

Le collecteur drainant objet particulier de cette étude (CD\_tronçon2) commence à partir du pk 18 720 (remblai 504) à l'aval hydraulique du CD\_tronçon1 dont la limite est matérialisée par un ouvrage hydraulique transversal (OTH, Pr de 100 ans). Il se situe entre deux voies (V2 et V6, Figure 23) dans la zone du déblai 505, et se rejette dans un bassin de rétention (BRN2) par une buse en béton.

Ce deuxième tronçon de collecteur drainant (CD\_tronçon2) sert à évacuer l'eau de la plateforme de la voie de circulation (V2) et celle de la moitié de la zone entre les voies de service V6 et V8.

Plus précisément, on trace deux coupes transversales schématiques des drainages longitudinaux du déblai 505 (a) et remblai 504 (b) à la Figure 24. Au niveau du déblai 505, le collecteur drainant (CD\_tronçon2) posé à 1,5m de profondeur a une double fonction pour :

- collecter le ruissellement de surface qui vient de la voie de circulation (V2), de la voie de service V6 et de la moitié de la plateforme entre les voies de service (V6 et V8) ;
- assurer le rabattement des eaux souterraines lorsque celles-ci sont présentes (Figure 24a).

Le FTR à barbacanes (Fossé terre revêtu, Figure 24) du côté de la voie de service au pied de déblai est moins profond (à 1,4m), et il sert à drainer l'eau :

- à gauche : de ruissellement de la voie V8 et V10, et de la moitié du ruissellement de la plateforme de la voie de service entre V6 et V10 ;
- à droite : de ruissellement de talus.

En général, l'eau souterraine dans le déblai 505 (Figure 24a) est plus profonde que l'entrée d'eau du FTR. Lors des visites mensuelles de terrain entre 2013 et 2016, le FTR était sec sauf à l'occasion d'épisodes de pluie.

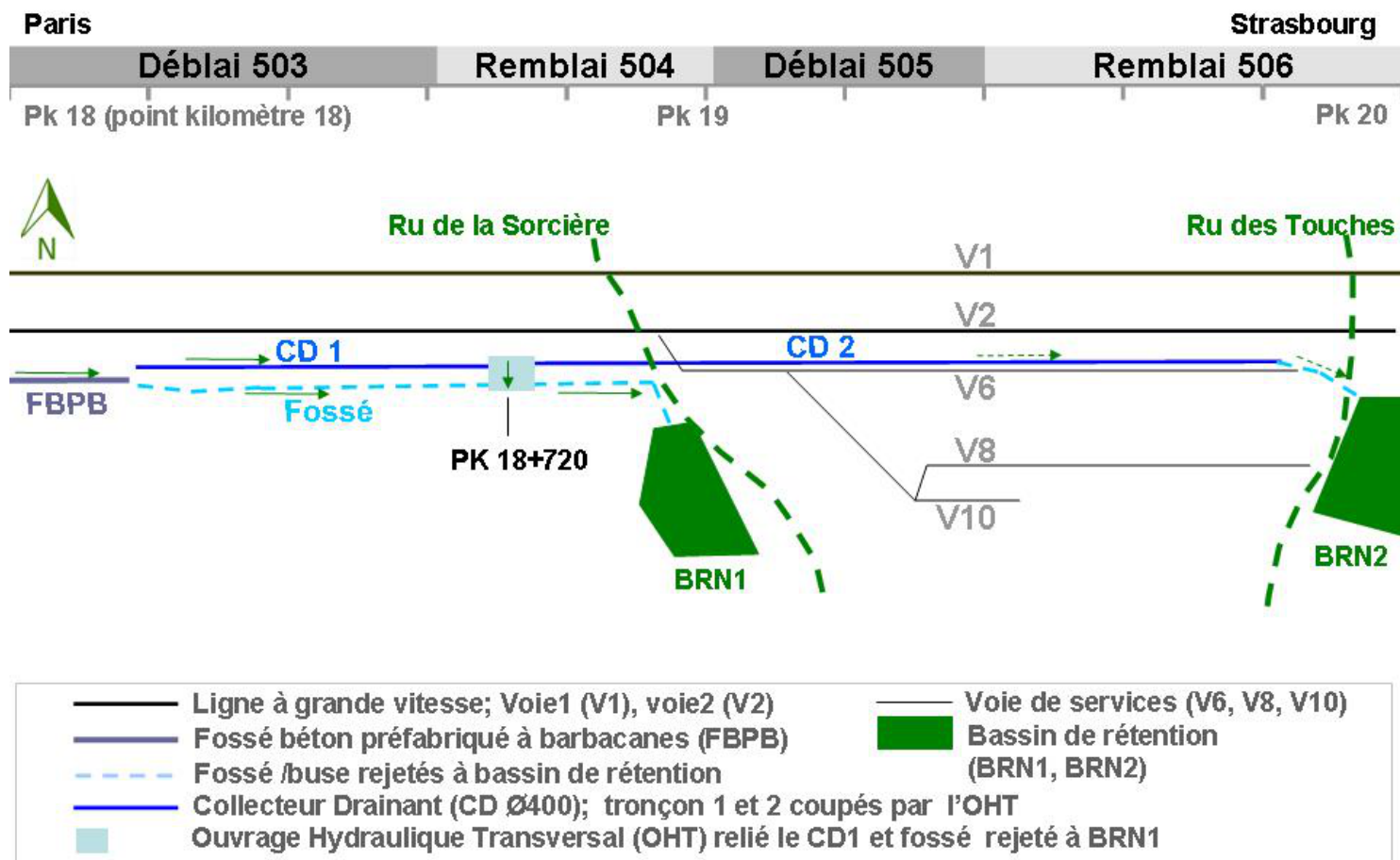


Figure 23: Drainages longitudinaux - Voie 2- pk 18 à 20 - Chauconin (77)

Au niveau du remblai 504 (Figure 24b), le CD posé à 1,5m de profondeur collecte le ruissellement qui vient de la voie circulation (V2), de la voie de service (V6) et de la moitié de la plate-forme entre les voies de service (V6 et V8). Dans cette zone, l'eau souterraine est plus profonde que l'entrée d'eau du collecteur drainant. Le FTR à barbacanes situé du côté de la voie de services (V8) est également beaucoup plus profond (> 10 m), et il collecte la moitié de l'eau de ruissellement de la plate-forme entre les voies de service V6 et V8, et le ruissellement des remblais. L'eau souterraine au toit du calcaire Saint - Ouen est aussi drainée par ce FTR.

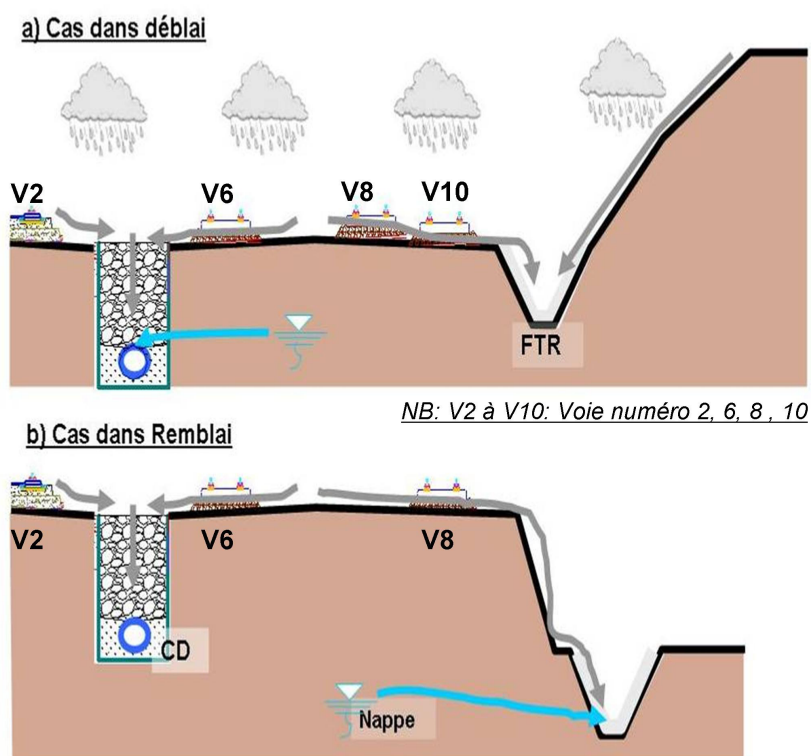


Figure 24: Coupes transversales schématiques des drainages longitudinaux du déblai 505, et du remblai 504 - Chauconin (77)

#### 4.4 Un système instrumenté et trois systèmes de Comparaison

A partir de la connaissance du système hydraulique de l'ensemble de la zone investiguée (D503 à R506, Figure 23), le tronçon correspondant au CD\_tronçon2 dans le D505 a été retenu pour l'instrumentation grâce notamment à sa grande accessibilité. Dans cette étude, le CD\_tronçon1, le FBPB et le FTR situés dans le déblai D503 constituent un système de comparaison, ils feront également l'objet de mesures ponctuelles. Le « Système de drainage ferroviaire » décrit précédemment inclue le bassin versant amont et les dispositifs de drainage eux-mêmes. Pour le cas de

Chauconin, ces quatre systèmes existants (CD2\_instrumentation = CD\_tronçon2, CD1\_comparaison = CD\_tronçon1, FBPB et FTR) sont comparés dans le Tableau 16.

Tableau 16: Caractéristiques des différents systèmes à Chauconin

Système	Eléments environnementaux						Composition du dispositif de drainage	
	Pluie	Nappe	Sol naturel	CO <sub>2</sub>	Matériaux drainant	Plateforme	Plastique	béton
CD2_instrumentation	*	*	*	*	*	*	*	
CD1_comparaison	*	*	*	*	*	*	*	
FBPB	*	*	*	*	*	*		*
FTR	*		*	*				*

Les caractéristiques des FBPB, FTR et CD\_tronçon1 et CD\_tronçon2 (Figure 23) présents sur le site de Chauconin sont décrits ci-après:

Le FBPB posé en pied du déblai 503 est de type FBPB M 80-15 : flancs verticaux percés d'orifices (barbacanes) de 80 mm de diamètre à 15 cm au-dessus du fil d'eau ; rehausse de 58 cm de hauteur, pente de 3mm/m, longueur de 0,75 m ou 1m. Latéralement les matériaux encaissants ont été remplacés par des matériaux drainants en calcaire.

Le fossé terre est de forme trapézoïdale. Lorsqu'il est revêtu par du béton, la fonction de drainage profond est assurée par la pose de barbacanes, il est alors appelé Fossé Terre Revêtu à Barbacanes (FTRb). Au pied du déblai 503 (coté voie 2) et 505 (Voie 1, voie 10, Figure 23), le FTRb est mis en place sous le point P (côte de l'axe de voie : Zp) de 1,4 à 1,6 m avec une pente de 3mm/m dans ce secteur. La pente maximale est fixée pour que l'écoulement des eaux ne dépasse pas la vitesse de 5 m/s (spécifications de la LGV Est-européenne).

Ils assurent le drainage longitudinal des plateformes en recueillant les eaux des talus du déblai. Le Collecteur drainant (CD\_tronçon1 et CD\_tronçon2) est en thermoplastique (PEHD), de diamètre 400mm, avec des fentes de 2mm de largeur espacées d'une dizaine de centimètres le long du collecteur. La pente est de 3mm/m, et le débit max autorisé est de 90l/s. Des regards d'accès sont disposés tous les 100m. Le collecteur est couvert par des matériaux drainants en calcaire contenant 1% de fines. Le géotextile placé tout autour du collecteur drainant est de type A1 ou A2S, conformément à la notice (SNCF, 2002). Il a une ouverture de maille de 100µm à ±30%. On considère donc qu'il laissera passer la majorité des matériaux fins (< 80 µm). Il repose sur un berceau en béton ordinaire étanche à teneur minimum en ciment de 250 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.5 Présentation du collecteur drainant instrumenté

### 4.5.1 Position et géométrie

Le tronçon de collecteur instrumenté (CD<sub>tronçon2</sub>) se situe entre deux voies : V2 et V6 (Figure 25a), entre le PK 19+070 et le PK 19+790. Il se compose de 9 regards (regard S1 à S9) et d'un exutoire (S10, Figure 25b).

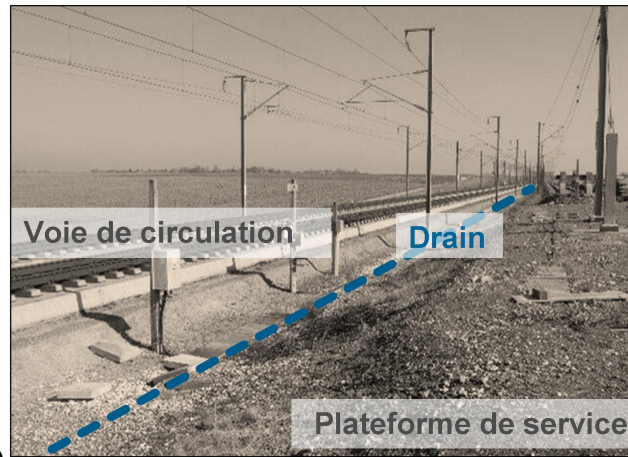
Afin de préciser la description de la géométrie des composants du système de drainage et leur état depuis la mise en exploitation, deux approches ont été mises en œuvre au début de l'étude :

- Un levé topographique au cours duquel, les cotes de la voie et de l'ensemble des couvercles des regards ont été mesurées ainsi que les fils d'eau dans chaque regard pour en vérifier la continuité (avril, 2014) ;
- Une visite caméra interne du collecteur après l'hydrocurage (des fentes colmatées réactivées) afin de localiser tous les défauts du CD (janvier 2014).

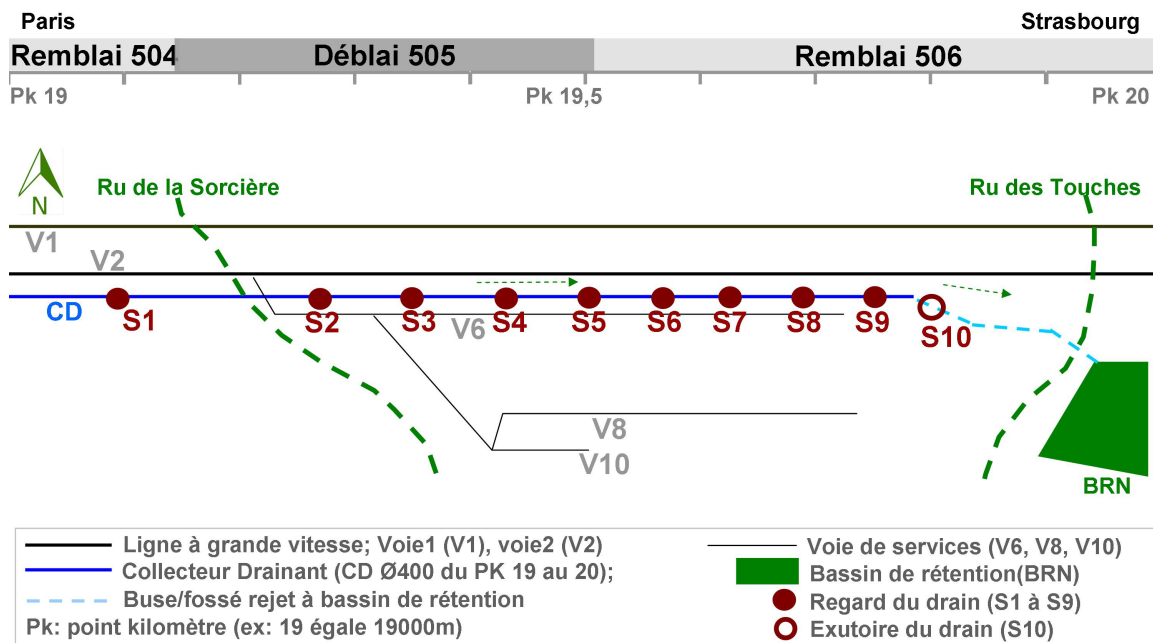
La Figure 26 présente le schéma longitudinal du collecteur avec la position des regards de S1 jusqu'à l'exutoire S10. Dans le dernier tronçon (entre S9 et S10), le drain rejoint l'exutoire au moyen d'un emboîtement à angle droit. Cet emboîtement et le raccordement de CD et la buse (changement de diamètre DN400 à DN600) peuvent jouer un rôle favorisant la précipitation de la calcite.

La Figure 27 présente le schéma longitudinal dans le sens de Paris vers Strasbourg. On voit qu'entre le premier regard (S1) et le dernier regard (S9), la pente du fil d'eau le long du collecteur est quasiment stable et faible (autour de 3mm/m, Figure 27). Puis, le fil d'eau chute rapidement de S9 jusqu'à l'exutoire S10. Ce fil d'eau a une pente proche de celle de la voie. Il est situé à environ 1,8 m sous la voie ce qui correspond bien aux codes de construction à la SNCF (1,5 m sous le point P).

Par contre, la profondeur entre le fil d'eau et chaque couvercle de regard peut varier. Le volume d'air stocké dans chaque regard n'est donc pas identique d'un regard à l'autre. En considérant que la totalité du système est strictement fermée vis-à-vis du CO<sub>2</sub> atmosphérique, nous pouvons faire l'hypothèse que la variation de ce volume d'air dans chaque regard peut jouer localement un rôle vis-à-vis de la cinétique de formation des dépôts.



a)



b)

Figure 25: Caractéristiques du CD\_tronçon2 choisi pour l'instrumentation-Chauconin (77)

#### 4.5.2 Niveau d'entartrage du collecteur drainant

Depuis 1994, faisant suite à des problèmes d'entartrage des collecteurs drainants, une large campagne d'inspection par caméra vidéo a été entreprise sur l'ensemble du réseau LGV. Cette campagne a permis d'observer les différentes zones de développement des dépôts carbonatés sur les collecteurs:

- i) au niveau des fentes ;
- ii) sur les flancs, ce qui forme des traînées ou des 'draperies', à partir de la base des fentes ;

- iii) en radier, leur développement étant moins marqué lorsque les écoulements sont permanents.

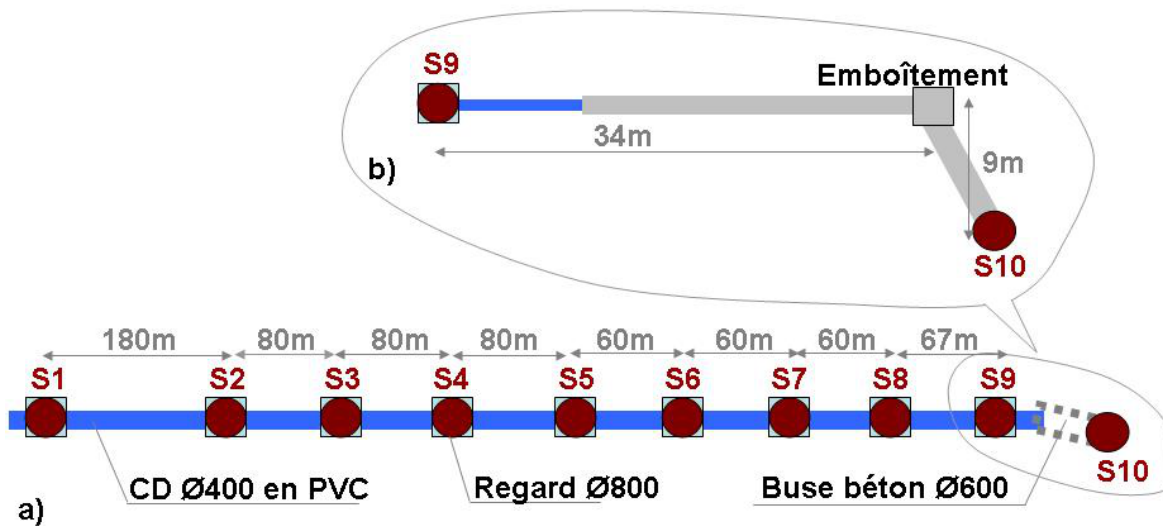


Figure 26: Schéma longitudinal du collecteur (S1 à S10) - Chauconin

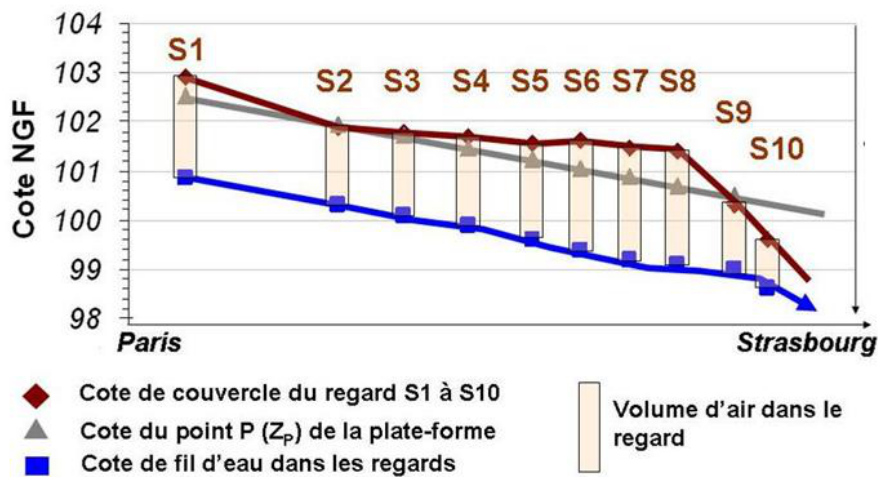


Figure 27: Profil en long du collecteur drainant -Chauconin (77)- 04/2014

Préalablement au curage du collecteur drainant sur le site de Chauconin, deux visites de terrain ont été effectuées dans le but de vérifier le niveau d'entartrage et donc de colmatage du drain après 10 ans de service :



- une 1<sup>ère</sup> investigation a été effectuée en février 2013 dans tous les regards dans le but de vérifier l'état de colmatage du drain au niveau des regards et des fentes en amont et en aval des regards (Tableau 17).
- une 2<sup>ème</sup> investigation a été effectuée après le curage réalisé en janvier 2014 au moyen d'une caméra passant à l'intérieur du collecteur afin de préciser cette régénération du CD. Le Tableau 17 présente les captures d'écran de ce passage caméra et les anomalies observées à l'intérieur du CD.



Figure 28: Etat initial du colmatage du collecteur drainant (CD\_tronçon2) - Chauconin (77)- 05/2013

Ces deux campagnes d'investigations visuelles, nous confirment comme sur les autres LGV investiguées la tendance du tartre à se former dans les endroits privilégiés que sont les fentes (Tableau 17), le radier (Tableau 17, colonne « vers Strasbourg »), les flancs (Tableau 17, colonne « vers Paris») et l'exutoire (Tableau 17, ligne S10) comme l'illustre la Figure 28.

Préalablement au curage du collecteur drainant sur le site de Chauconin, deux visites de terrain ont été effectuées dans le but de vérifier le niveau d'entartrage et donc de colmatage du drain après 10 ans de service :

**Tableau 17: Etat du collecteur drainant (CD\_tronçon2) après 10 ans d'exploitation de la ligne (avant hydrocurage) - Chauconin en février 2013**

N°	Pk	Vers Paris	Vers Strasbourg	Fentes	Regard
S1	19 070				
S2	19 260				
S3	19 340				
S4	19 420				
S5	19 500				
S6	19 560				
S7	19 620				
S8	19 680				
S9	19 750				
S10	19 790				

- une 1<sup>ère</sup> investigation a été effectuée en février 2013 dans tous les regards dans le but de vérifier l'état de colmatage du drain au niveau des regards et des fentes en amont et en aval des regards (Tableau 17).
- une 2<sup>ème</sup> investigation a été effectuée après le curage réalisé en janvier 2014 au moyen d'une caméra passant à l'intérieur du collecteur afin de préciser cette régénération du CD. Le Tableau 17 présente les captures d'écran de ce passage caméra et les anomalies observées à l'intérieur du CD.
- changement de surface interne du collecteur : cf. regard S4 (colonne regard) dans le Tableau 17, au niveau du passage de la surface plastique vers la surface béton, du tartre s'accumule dans ce regard ; phénomène également observé dans les regards S3 à S9 ;
- rupture de fil d'eau (regard S9, photo 6 dans Tableau 18) : le tartre s'accumule en aval de cette rupture de fil d'eau ;
- présence de racines (regard S2, photo 5 dans Tableau 18) : le tartre s'accumule au niveau des racines présentes dans le CD.

## **4.6 Mise à l'état zéro du système de CD**

### **4.6.1 Réactivation des fonctionnalités du collecteur par hydrocurage**

Afin de permettre le suivi du processus de formation des dépôts dans le collecteur, il a été nécessaire de procéder à un curage du collecteur permettant ainsi de créer les conditions d'un « état zéro » (fentes et section d'écoulement réactivées) préalablement au démarrage de l'instrumentation et de l'étude.

Ainsi, en janvier 2014, durant quatre nuits, il a été procédé à un hydrocurage du collecteur et des fentes à très haute pression (supérieure à 500bars) par un robot du regard S1 à l'exutoire S10 (Figure 25). L'état du collecteur et des fentes avant et après cette opération de maintenance est illustrée Figure 29. Les fentes du collecteur étudié sont bien réactivées après le nettoyage.

Un passage de caméra le long du collecteur (S1 à S10) a ensuite été effectué. Les détails de l'état de surface interne du collecteur, des fentes et du radier sont donnés dans le paragraphe suivant.

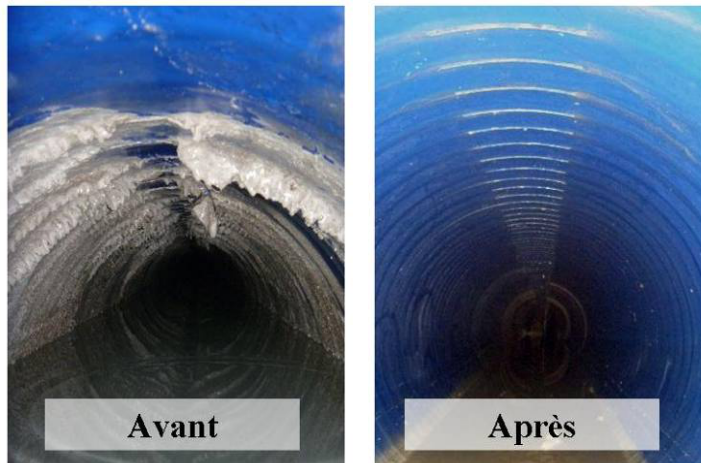


Figure 29: Etat du collecteur drainant CD\_tronçon2 avant (fév.2013) et après hydrocurage (2014) - Chauconin (77)


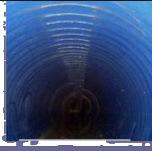





#### 4.6.2 Anomalies observées dans le CD suite à l'hydrocurage

Le Tableau 18 présente un diagnostic visuel effectué entre chaque regard lors du passage caméra post-hydrocurage en 2014. Cette visite confirme qu'au niveau des regards, il y a un changement de la surface interne du CD : la surface interne du collecteur drainant est en PEHD (Polyéthylène haute densité). Au niveau des regards, le radier du collecteur est en béton (photo1, Tableau 18).

Des anomalies ont été observées pendant et après l'opération de l'hydrocurage :

- Au niveau de l'emboîtement des segments de collecteur espacés tous les 7m notamment on observe la formation d'un barrage de dépôts (photo 2, Tableau 18) ;
- Endommagement du collecteur en voûte pendant le curage 90m après le premier regard S1 (photo 3, Tableau 18) ;
- Emboîtement insuffisant à certains endroits, la surface du lit béton est à nu (Photo 4, Tableau 18). Ce changement de surface favorise aussi la formation de barrage de dépôts ; A 11 mètres après le dernier regard S9, le collecteur est suivi par une buse en béton de diamètre plus large (Ø600 vs. Ø400). L'emboîtement insuffisant crée un barrage de dépôt réduisant l'écoulement et conduisant à la formation d'une lame d'eau plus épaisse dans S9 que dans les autres regards ;

Tableau 18: état de la surface interne du collecteur (CD 2)– visite caméra après curage en 01/2014 - Chauconin

Tronçon	A mètre	Nature	Ø: mm	Photos	Observations
S1 à	0	Béton	800	 1	Regard S1, profond 2,04m
	48	PVC	400	 2	Barrage de dépôts au niveau d'emboîtement (tout les 7m)
	90	PVC	400	 3	Eclatement du collecteur pendant curage
	180	Béton	800	Pareil que 1	Regard S2, profond 1,56m
S2 à	10,5	PVC	400	 5	Pénétration des racines
	50,5	PVC	400	Pareil que 5	Pénétration des racines
	54,3	PVC	400	 4	Emboîtement insuffisant
	80	Béton	800	Pareil que 1	Regard S3, profond 1,71m
S3 à	72	PVC	400	Pareil que 5	Pénétration des racines
	80	Béton	800	Pareil que 1	Regard S4, profond 1,81m
S4 à	80	Béton	800	Pareil que 1	Regard S5, profond 1,96m
S5 à	60	Béton	800	Pareil que 1	Regard S6, profond 2,22m
S6 à	60	Béton	800	Pareil que 1	Regard S7, profond 2,29m
S7 à	5,5	PVC	400	Pareil que 4	Emboîtement insuffisant
	60	Béton	800	Pareil que 1	Regard S8, profond 2,33m
S8 à	67	Béton	800	Pareil que 1	Regard S9, profond 1,32m
S9 à	11	PVC	400	 6	Passé collecteur PVC Ø400 à buse béton Ø600
	34	Béton	600	 7	Emboîtement insuffisant, angulaire à droite
	50,5	Béton	600		Exutoire S10, pente varié de 3mm/m à 30mm/m
NB : Position de S1 à S10					

- Présence de racines végétales au niveau des fentes (photo 5, Tableau 18) autour desquelles se forme un dépôt créant un barrage ;



- 34 mètres après le regard S9, le collecteur forme un coude en direction de l'exutoire. La buse d'angle en béton angulaire vers la droite crée aussi localement un barrage de dépôts.

Le dernier tronçon de buse en béton (9m, Figure 26) jusqu'à l'exutoire a une pente 10 fois plus grande que celle du collecteur : 30mm/m vs. 3mm/m. On observe moins de calcite précipitée dans ce dernier tronçon.

En résumé, le CD est régénéré par suppression du tartre sur les 800m de long. Cependant ce nettoyage met à jour des défauts d'installation au niveau des raccords qui produisent des décalages de fil d'eau. Il s'agit de défauts d'emboîtement, de nivellement au radier d'un regard et de changement de pente.

## 4.7 Conclusion

### 4.7.1 Reconnaissance du « système du CD » de Chauconin

La Figure 30 présente la coupe transversale du collecteur drainant dans son contexte géotechnique et géologique. Elle met en évidence un système multi-milieux constitué de la plate-forme, de la colonne des matériaux drainant et du drain ; et multi-phasique dans lequel circulent des éléments liquides (eaux), solides (dépôts carbonatés) et gazeux (CO<sub>2</sub>).

Dans ce système complexe circulent des eaux de différentes origines (pluie ou provenant du sous-sol). Au cours de ce parcours, elles peuvent réagir selon les différents matériaux qu'elles traversent. Plusieurs réactions peuvent apparaître, par exemple, la dissolution/dégazage de CO<sub>2</sub> entre l'air et l'eau ou la dissolution/précipitation d'une phase minérale entre l'eau et matériaux. Ces réactions d'ensemble peuvent conduire à une sursaturation de la calcite dans l'eau entrant dans le CD. Cette eau crée la formation de dépôts calcaires dans le CD selon l'équation suivante :



Le système étudié peut être divisé en deux sous-systèmes :

- i) Sous-système 1 : système de bassin versant en amont du CD ;
- ii) Sous-système 2 : système du CD lui-même.

Le sous-système 1 se compose de 2 colonnes de matériaux différents :

- i) Une colonne de matériaux drainants qui est généralement bien perméable (colonne-MD) ;
- ii) Une colonne de matériaux de plateforme qui est peu perméable (colonne-PF).

Le sous-système 2, le collecteur tout seul, est un réacteur où la formation des dépôts est contrôlée par les voies thermodynamique et cinétique. Les deux sous-systèmes sont connectés entre eux par l'entrée d'eau dans les fentes au sommet du collecteur.

Nous définissons le fonctionnement du système total à travers deux processus (Figure 30b):

- i) Processus physique ( $Q_i$ ): transport de l'eau interne du système ;
- ii) Processus chimique ( $C_i$ ) : transport des réactifs/solutés internes au système. Transport du gaz lié aux conditions de la colonne de sol ou de matériaux ferroviaires traversés. Dans la zone vadose (non saturée), le transport du gaz est dépendant de la réaction de dissolution, adsorption ou dégazage entre l'eau et l'air qui est contrôlée par l'écart de la  $P_{CO_2}$  interne-externe de l'eau. Dans la zone saturée, le transport du gaz est sous forme de gaz dissout qui est contrôlé par le pH de l'eau.

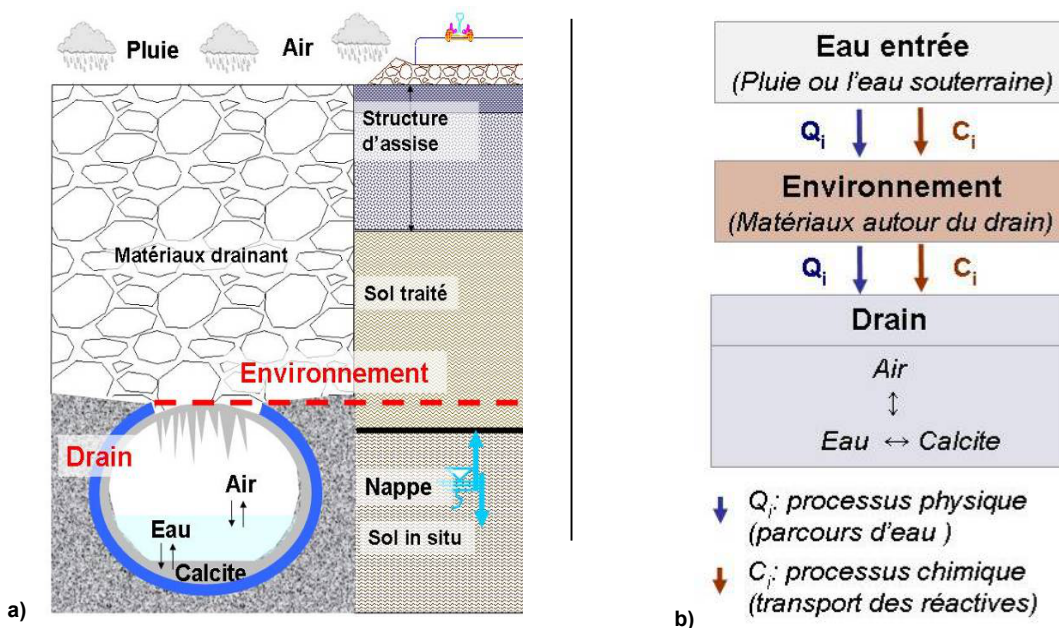


Figure 30: Caractéristiques du système étudié - Chauconin (77)

NB : b)  $Q_1, Q_2$  – débit ;  $C_1, C_2$  –concentration des solutés

## Chapitre5 L'instrumentation et l'expérimentation

### 5.1 Objectifs de l'instrumentation et de l'expérimentation

Les interactions entre le bassin versant (BV : de sol naturel et de plate forme ferroviaire) en amont du collecteur drainant (CD) et le CD lui-même se produisent via deux modes de TRANSPORT: physique (écoulement) et chimique (ions dissouts). L'instrumentation et l'expérimentation du site de Chauconin doivent nous permettre de connaitre et quantifier ces interactions amont –aval (BV – CD) : La sursaturation de calcaire dissout (quantité et dynamique) dans l'eau en traversant le BV en amont du CD, conduisant à la formation de dépôts (quantité et dynamique) dans le CD en aval.

C'est-à-dire que l'instrumentation et l'expérimentation doivent permettre de répondre aux quatre questions suivantes:

- i) Sources de calcaire dans l'environnement naturel et ferroviaire ;
- ii) Etat thermodynamique de l'eau du CD et origines environnementales ;
- iii) Hydrodynamique et Hydrochimie de l'eau du CD ;
- iv) Cinétique de formation des dépôts dans le CD et son évolution dans l'année.

Ainsi le chapitre qui suit présente la démarche suivante en quatre étapes :

Le sol et les matériaux de la plateforme sont échantillonnés dans les sondages géotechniques puis analysés au laboratoire dans le but d'identifier leurs phases minérales.

L'eau de la pluie, l'eau prélevée dans les piézomètres, l'eau dans le FBPB et le FTR du D503, l'eau du CD<sub>tronçon1</sub> et CD<sub>tronçon2</sub> sont échantillonnés dans le but de connaitre la qualité de l'eau sur le site de Chauconin et son évolution dans le système du CD.

L'hydrodynamique du système de CD (relation Pluie-débit) est suivie par l'instrumentation d'un pluviographe sur site et un débitmètre à la sortie du CD. L'hydrochimie du système du CD est suivie par l'instrumentation de 5 capteurs physico-chimiques (pH, T°C,  $\sigma$ ,  $P_{CO_2}$  air et  $CO_2$  dissout) dans l'eau du CD. L'instrumentation des capteurs est réalisée après un hydrocurage du collecteur afin de réactiver les fentes du CD en enlevant les dépôts accumulés.

L'eau et les dépôts du CD sont échantillonnés saisonnièrement dans le but de vérifier l'évolution saisonnière de l'eau et de la phase minérale des dépôts. La cinétique



de la formation des dépôts au fond du CD est estimée mensuellement par des lames en verre immergées dans l'eau.

## 5.2 Stratégie et questions techniques

Les quatre principales questions identifiées précédemment auxquelles ce travail souhaite répondre sont relatives i) aux sources des réactifs ; ii) à la thermodynamique de l'eau ; iii) à son hydrochimie ; iv) à la cinétique des réactions, ont pour processus communs la physique liée à la dynamique de l'eau et la chimie relative aux solutés transportés dans le système.

L'instrumentation et les expérimentations sur le site pilote de Chauconin porte donc sur les objectifs suivants :

### 1) Sources des réactifs (chapitre 6) ;

- Déterminer la nature des matériaux dans l'environnement du collecteur drainant ;
- Déterminer la nature, la texture et la quantité des dépôts présents dans le collecteur;

### 2) Etat thermodynamique de l'eau (chapitre 6 et 7);

- Déterminer la nature de l'eau drainée par le collecteur ;
- Déterminer la nature de l'eau circulant dans l'environnement du collecteur (eau issue du passage à travers les matériaux drainants et à travers la plateforme) ;
- Connaitre l'évolution de la chimie de l'eau dans le collecteur à diverses échelles de temps (lors d'un épisode de pluie, à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle);
- Identifier le stade du processus à partir duquel les dépôts se forment dans le collecteur ;

### 3) Hydrodynamique et hydrochimie du système du CD (chapitre 8);

- Mettre en évidence l'existence d'une nappe perchée dans la plateforme, caractériser son fonctionnement vis-à-vis de la pluviométrie et sa contribution spatio-temporelle au système ;
- Caractériser la relation pluie-débit dans le collecteur drainant et estimer le bilan hydraulique à l'échelle d'un épisode pluvieux, à l'échelle mensuelle, saisonnière et annuelle ;
- Préciser la répartition des écoulements dans le système (ruissellement et infiltration), quantifier leur temps de séjour en identifiant notamment, la fraction traversant les matériaux drainants et celle traversant la plateforme lors d'un épisode de pluie;
- Déterminer la vitesse de formation et la quantité de dépôts carbonatés dans le collecteur ;
- Quantifier la contribution chimique des matériaux drainants au cours du processus de formation de carbonates de calcium ;
- Quantifier la contribution des matériaux de plateforme pendant le processus de la formation de dépôts calcaires ;
- Déterminer le type de système formé par le CD (ouvert ou fermé) et caractériser son rôle ainsi que celui de sa géométrie (position et forme des fentes, nature de surface du collecteur, joints/ raccordement du collecteur, changement de la ligne d'eau lié à la pente, ...) dans le processus d'entartrage.

#### 4) Cinétique de la formation des dépôts (chapitre 9)

- Simuler et estimer la quantité de la formation des dépôts carbonatés sous différentes conditions hydriques : avec ou sans débit dans le CD.

Les campagnes de terrain sur les huit sites flashes servant à compléter les études de site pilote d'un point de vue i) théorique et ii) opérationnelle.

#### 1) Exploitation des études du site pilote et des sites flashes (chapitre 10)

- Résumer les mécanismes communs vis-à-vis du problème d'entartrage dans les drains ferroviaires ;
- Identifier un jeu de paramètres servant à explorer, identifier, et classifier ces neuf cas d'étude vis-à-vis des deux objectifs industriels : préventif et curatif.

## 2) Perspectives dans l'industrie (Chapitre 10)

- Proposer les principes d'un outil d'aide à la décision vis-à-vis du problème d'entartrage dans le contexte ferroviaire ;
- identifier des solutions opérationnelles selon les caractéristiques du site et le niveau d'entartrage.

## **5.3 Choix des matériels et méthodes d'étude**

### **5.3.1 Aspects physiques**

#### a) Dynamique de l'eau au niveau du collecteur

Afin de comprendre la dynamique du système d'eau dans le collecteur, notamment la relation pluie-débit – nappe, un pluviographe, un débitmètre et des capteurs piézométriques ont été installés in situ. Les données sont enregistrées simultanément. Les détails de l'installation (position, date, fréquence et durée d'acquisition) et les caractéristiques des capteurs (unité, gamme, incertitude) sont décrits dans le § 5.4.

#### b) Écoulement préférentiel dans le système de drainage

Afin d'identifier l'écoulement préférentiel (ruissellement et infiltration) dans le système de drainage, le travail se base sur la simulation de la relation pluie-débit (détaillé dans le chapitre 8).

### **5.3.2 Aspects chimiques**

#### a) Caractéristiques de l'eau

Pour répondre aux questions relatives aux caractéristiques de l'eau drainée par le collecteur et de l'environnement, l'eau de pluie, celle des piézomètres, l'eau du

collecteur et l'eau identifiée dans la plateforme au niveau de l'interface de la sous-couche et de la couche de forme sont régulièrement échantillonnées et analysées au laboratoire (détails au § 5.4). Les résultats sont donnés dans les chapitres 6 et 7.

#### b) Caractéristiques des dépôts et matériaux

Pour répondre aux questions concernant les caractéristiques des dépôts et matériaux présents dans l'environnement du collecteur, le sol naturel (limon et calcaire Saint-Ouen), les matériaux drainants et les matériaux de la plateforme sont échantillonnés, séchés et analysés au laboratoire (détails §5.4). Les résultats détaillés sont présentés dans le chapitre 6.

#### c) Rôle des matériaux drainant, rôle des matériaux de plateforme

La question des matériaux identifiés comme pouvant jouer un rôle dans le processus d'entartrage du collecteur, est abordée à travers la simulation hydrogéochimique. Le modèle utilisé est PHREEQC (chapitre 9), développé par l'USGS (United States Geological Survey) dont on adapte le codage du 1-D transport. La simulation est justifiée par les données in situ acquises par les capteurs physico-chimiques (pH et conductivité). Les résultats de simulation sont présentés dans le chapitre 9.

#### d) Type de système fermé ou ouvert à la pression de CO<sub>2</sub> atmosphérique

Pour déterminer le type de système dans lequel se produisent les réactions de précipitation, et le rôle des regards de visite, des tests ont été réalisés dans le regard 9 qui accueille les capteurs physico-chimiques. Des tests d'ouverture et de fermeture du couvercle ont été réalisés à l'échelle de temps horaire afin de mesurer leur impact sur la variation de la pCO<sub>2</sub> et du CO<sub>2</sub> dissout. Les mesures réalisées pendant ce test sont comparées aux données des capteurs acquises à plus long terme. Le chapitre 8 en présente les résultats.

#### e) Rôle de la géométrie du collecteur

L'étude du rôle de la géométrie (i.e. largeur de fente) du collecteur drainant sur le processus est basée sur les éléments bibliographiques fournis lors de tests effectués à SNCF Réseau avant la thèse. Cette étude peut être approfondie par des estimations simples de l'évolution du CO<sub>2</sub> dissout en amont et en aval des fentes du collecteur par l'écoulement diphasique à travers un orifice.

#### f) Evolution de la chimie de l'eau et stade de précipitation

Des capteurs physico-chimiques de pH, température, conductivité, pression partielle de CO<sub>2</sub> dans l'air (pCO<sub>2</sub>) et concentration du CO<sub>2</sub> dissout permettant la synchronisation avec les données de pluie et de débit du collecteur sont installés dans ce dernier. Ils ont pour but d'étudier l'évolution de la chimie de l'eau et de déterminer le stade de précipitation des dépôts. Le détail de l'instrumentation est précisé dans le paragraphe §5.4, les résultats d'acquisition sont présentés dans les chapitres 6, 8 et 9.

Des campagnes d'échantillonnage de l'eau et des dépôts sont réalisées mensuellement dans le regard S9 où les capteurs sont installés dans le but d'estimer la thermodynamique de l'eau et de déterminer et quantifier la phase minérale qui va précipiter. Ces données d'analyse chimique (§ 5.4) servent à compléter la base de données de suivi de la chimie dans le CD acquise par les capteurs. Les résultats de ces analyses chimiques sont donnés dans les chapitres 6 et 9.

#### g) Vitesse de précipitation des dépôts

Afin d'estimer la vitesse de précipitation des dépôts dans le collecteur, des portes-échantillons (lames fines en verre) sont immergés dans l'eau du collecteur. Ils sont destinés à recueillir les dépôts de carbonates de calcium dont la masse est mesurée mensuellement après séchage. Le détail de cette instrumentation est précisé dans le paragraphe §5.4, le détail des résultats est présenté dans le chapitre 9.

## **5.4 L'instrumentation du site**

Ce chapitre précise la description des matériels et méthodes évoqués précédemment relatifs à l'instrumentation du site de Chauconin.

### **5.4.1 Chronologie de l'instrumentation**

Les investigations et l'instrumentation du site de Chauconin se sont déroulées entre septembre 2013 et juillet 2014 (Figure 31). La Figure 32 affiche les positions des investigations et de l'instrumentation.

Les investigations ont commencé par une inspection caméra effectuée entre le regard S2 et le regard S5 (Figure 32) en septembre 2013 en début de la thèse pour vérifier l'état d'entartrage de collecteur drainant (CD) de tronçon 2 entre les PK 19 et 20.

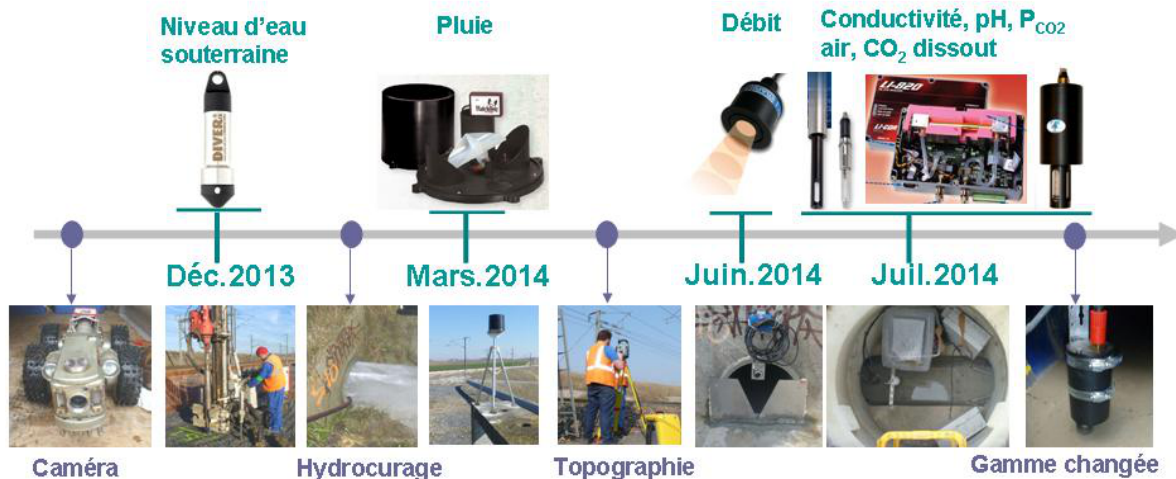


Figure 31: Chronologie d'instrumentation du site test de Chauconin (77)

Puis, des sondages géotechniques : 2 tarières (P4 et P5, Figure 32) et 3 carottages (P1, P2 et P3) ont été effectués en décembre, 2013 entre le PK 17 et 20 dans le but de :

- Connaître les caractéristiques du sol in situ et de la plateforme ferroviaire.
- Installer les piézomètres (P1 à P5) après les sondages pour suivre les niveaux d'eau souterraine dans l'année.

L'instrumentation s'est déroulée dans le dernier regard S9 de mars à fin juillet 2014, après le nettoyage du CD (800 m de longueur) effectué en janvier 2014 par hydrocurage (terrain de 4 personnes, durée 4 nuits), dans l'ordre suivant :

En mars 2014, le pluviographe est installé à côté du regard S9 à la hauteur de 2 m à partir de la surface de la plateforme dans le but de suivre la pluie in situ.

En avril 2014 un relevé topographique est effectué le long du CD\_tronçon2 de 800 m, il servira notamment au calcul de la surface de bassin versant ferroviaire.

En mai 2014, en profitant d'une faible lame d'eau, un seuil de déversoir est installé à l'exutoire afin de cumuler suffisamment de hauteur d'eau pour faciliter la mesure de débit.

En juin 2014, la sonde à ultra son est installée à l'exutoire au-dessus du seuil du déversoir dans le but de mesurer la hauteur d'eau déversée afin d'estimer le débit du CD.

En juillet 2014, les capteurs chimiques (pH, conductivité, température, pCO<sub>2</sub> air et CO<sub>2</sub> dissout), la centrale d'acquisition et la centrale d'alimentation (piles de signalisation) sont installés dans le regard S9.

#### **5.4.2 Localisation des capteurs, caractéristiques et fréquences mesurées**

La Figure 32 présente la localisation des différents postes de mesures entre les PK 19 et 20.

##### **a) Piézomètres et capteurs piézométriques**

En décembre 2013, dans le cadre des investigations géotechniques inhérentes à cette étude, cinq piézomètres (nommés P1 à P5, Figure 32) ont été installés sur le site test de Chauconin. : i) trois dans le sol naturel (P3, P4 et P5) ; ii) deux en piste à proximité de la plateforme (P1 et P2). P1 à P4 se situent dans l'emprise du collecteur étudié, P5 est situé à 1,5 km à l'amont du tronçon testé. Chaque piézomètre a été équipé d'un mini-diver pour permettre le suivi en continu (mesure toutes les 15 minutes) du niveau des nappes potentielles.

Le Tableau 19 rassemble les informations essentielles (PK, cote de surface, cote du fond d'ouvrage, cote de position de capteur de niveau d'eau, et section crépine) des cinq piézomètres.

Le Tableau 20 synthétise les caractéristiques des différents capteurs utilisés, avec leur unité, la gamme de mesure, la fréquence, la durée d'acquisition et incertitude. Le descriptif complet est décrit dans le paragraphe suivant.

##### **b) Pluviographe**

Le pluviographe (SDEC watchdog 120, Tableau 20) est un entonnoir à auget à bascule (1 bascule = 0,254 mm). Il permet le suivi de la hauteur des précipitations toutes les minutes. Programmé selon le principe d'une visite de terrain mensuelle et en fonction de la limite de capacité de mémoire (8000 mesures) de ce pluviographe, la fréquence de la mesure peut descendre jusqu'à une mesure toutes les 5 minutes.

##### **c) Débitmètre (seuil triangle couplé à une sonde à ultrason) à l'exutoire**

Comme expliqué dans le paragraphe §5.3, le débitmètre utilisé à Chauconin est un seuil triangle (45°) à paroi mince couplé à un capteur à ultrason (Nivus - NMI0031000000H, Tableau 20) qui est présenté dans la Figure 33. Le seuil a été

réalisé sur mesure, l'angle 45° a été choisi en respectant les marges de l'installation de trois bords et la marge minimale (12,5 cm) entre la surface de ultra sonde et la surface de l'eau déversée.

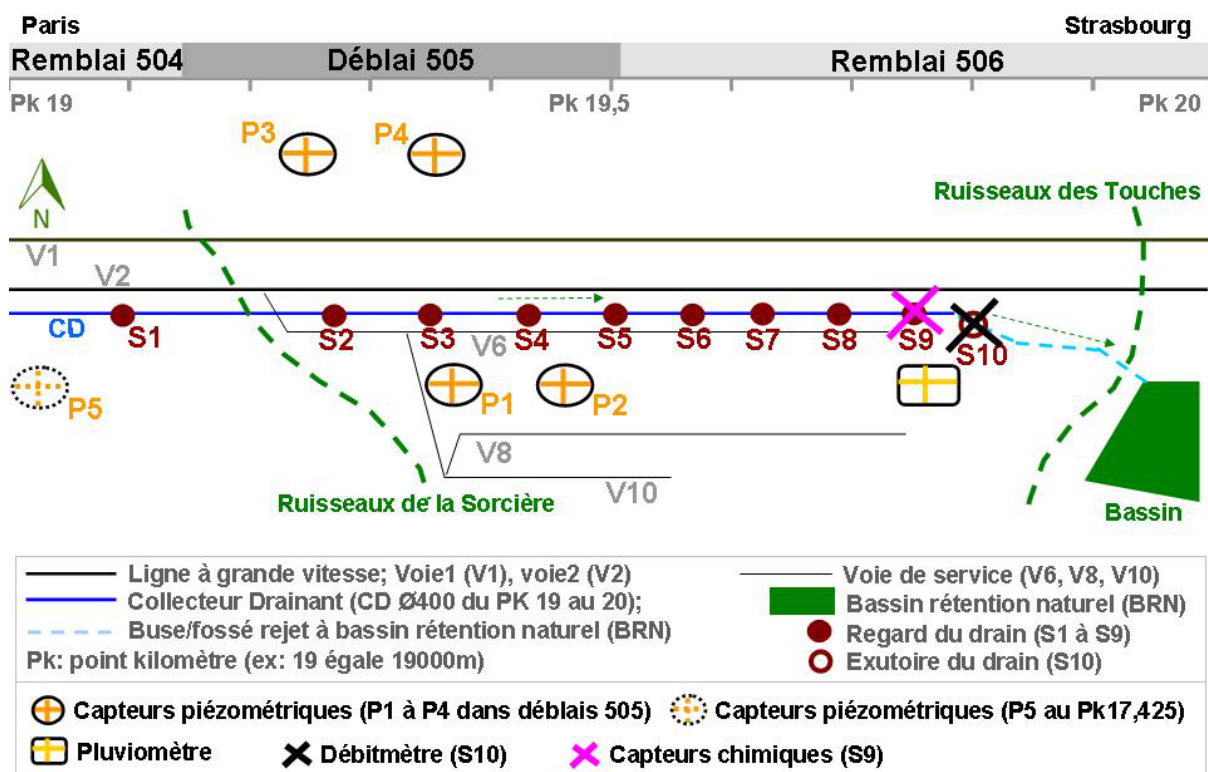


Figure 32: Plan d'instrumentation des capteurs physico-chimiques-Chauconin (77)

Tableau 19: Caractéristiques des piézomètres et positions des capteurs

N° du Piézomètre	Point kilomètre	Côté de la voie	Cote de terrain naturelle NGF	Cote du fond de piézomètre NGF	Cote de sonde NGF	Section crépine NGF
P1	19320	V2	102.135	98.94	99.44	98.94 -101.64
P2	19420	V2	101.882	98.58	98.9	98.58-101.38
P3	19245	V1	106.674	98.67	98.97	98.67-101.17
P4	19320	V1	105.439	102.1	102.64	102.10-104.60
P5	17475	V2	111.944	103.94	104.74	103.94-106.94



Tableau 20: Synthèse des caractéristiques des capteurs - Chauconin (77)

Capteurs	Unité	Gamme	Pas de temps	Temps d'acquisition	Incertitude
Sol solution mini-diver 11.11.01.02	Niveau d'eau (cm)	0 ~ 10 m	15 min	2013.12 ~ 2016.06	± 0.2% de lecture
SDEC watchdog120	Pluie (mm)	0 ~ 6,5 cm/min	5 min	2014.03 ~ 2016.06	± 0.254 mm
Nivus ultrasonic NMI0031000000H	Hauteur d'eau (m)	0.125 ~ 3 m	5 min	2014.06 ~ 2016.06	±2 mm
WTW-WQL-pH/Cond SET	pH, T°C	pH (0~12); T°C (0~ 60°C);	5 min	2014.06 ~ 2016.06	± 0.2 pH
	µS/cm, T°C	0 ~ 1000 mS/cm ; -5 ~ 105°C	5 min	2014.06 ~ 2016.06	± 0.5% de lecture ; ±0.1°C
Li-cor Li-820 CO <sub>2</sub> analyseur	Pression partielle CO <sub>2</sub> -air (ppm)	0 ~ 5000 ppm	3h	2014.07 ~ 2016.06	±3% de lecture
Sol solution Baro-diver 11.11.55.01	Pression atmosphérique (cm H <sub>2</sub> O)	0 ~ 1500 cm	15 min	2013.12 ~ 2016.06	± 3cm H <sub>2</sub> O (0.003atm)
Delta OHM Baro HD 9408T (Regard S9)	Pression totale de l'air (bars)	800 ~ 1100 mbar	3h	2014.07 ~ 2016.06	±0.25% de lecture
AquaMS sonde CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> dissout dans l'eau (mg/l)	0 ~ 30 mg/l	3h	2014.07 ~ 2016.06	±5% de lecture

Le choix s'est porté sur ce type de couplage d'après la faiblesse des débits observés lors des visites de terrain de reconnaissance préliminaire pour l'instrumentation du site. Il avait en effet été estimé que pendant le temps sec, la hauteur d'eau à la sortie du drain était généralement inférieure à 1 cm, pour un diamètre de buse de sortie de 50 cm, ce qui ne représentait pas suffisamment d'eau pour l'utilisation d'un débitmètre immergé.

Ce système fixé à l'exutoire du collecteur peut mesurer en continu avec un pas de temps de 5 minutes la hauteur d'eau totale ( $H_{\text{eau}_t}$ ). Pour calculer la hauteur d'eau déversée ( $H_{\text{eau}_d}$  : juste la partie d'eau en amont du seuil), on enlève 5 cm de zone morte. Il convertit ensuite la valeur  $H_{\text{eau}_d}$  mesurée en débit (l/s) au moyen de l'équation de Kindsvater V - Notch Weir. Cette équation est recommandée par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO 1438-1, 1980) pour l'étude de l'écoulement uniquement d'un canal rectangulaire, n'existant pas d'équation pertinente dans la littérature pour l'estimation du débit déversé dans un canal circulaire correspondant à notre contexte d'étude, cette équation doit être corrigée par un étalonnage in situ.

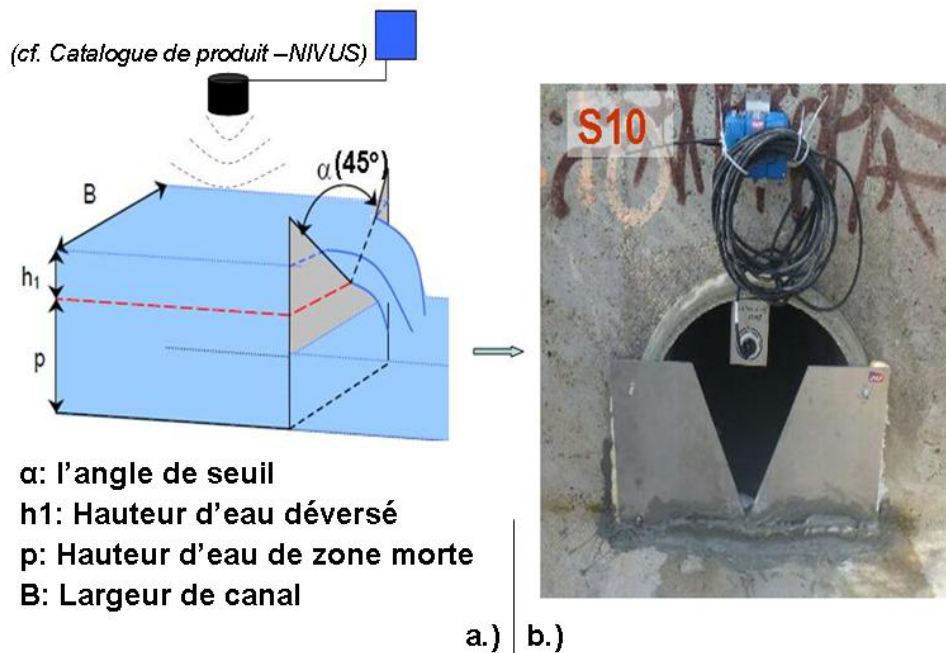


Figure 33: Système théorique (a) de mesure du débit à l'exutoire (Nivus) adapté au site de Chauconin (b)

#### d) Capteurs chimiques dans le regard S9 d'instrumentation

En janvier 2014, suite à l'hydrocurage, le collecteur drainant a été instrumenté pour permettre le suivi de l'évolution de la chimie de l'eau au cours d'un nouveau cycle de formation de dépôts. Préalablement, l'ensemble des capteurs a fait l'objet de tests de fonctionnement et d'étalonnage au laboratoire.

Le choix pour l'installation des capteurs de suivi de l'évolution de la chimie de l'eau s'est porté sur le dernier regard (S9, Figure 32) du collecteur avant l'exutoire de sorte qu'il y ait suffisamment d'eau pour immerger les capteurs et les portes-échantillons (poste 2 ; Figure 34).

Ce regard comporte notamment une centrale d'acquisition (Campbell CR800, poste 4 ; Figure 34) programmée pour enregistrer les mesures de concentration de  $\text{CO}_2$  dissout (poste 3 ; Figure 34) et celles de  $\text{CO}_2$  gazeux (poste 5 ; Figure 34). Pour éviter les contraintes de raccordement de câble (i.e. creuser des tranchées dans la plateforme ferroviaire) et les risques de vandalisme, il a été choisi d'alimenter la centrale et les sondes par piles soit 8 unités de piles de signalisation de 1,5 V. La durée d'autonomie de 37j de cette station d'alimentation (poste 1; Figure 34) conduit à l'organisation d'une campagne de terrain mensuelle pour le remplacement des piles. Cette campagne permet de décharger les mémoires des sondes, d'en vérifier le bon fonctionnement et de réaliser les opérations de maintenance le cas échéant (nettoyage, réparations).

- Suivi du CO<sub>2</sub> dissout dans l'eau

La concentration en CO<sub>2</sub> dissout (mg/l) dans l'eau est mesurée au moyen d'une sonde immergée dotée d'un capteur optique (AquaMS sonde CO<sub>2</sub> dissout, Tableau 20). Les valeurs de mesure doivent être compensées à la température de l'eau (poste 3 ; Figure 34). Les parois de la chambre de mesure (cellule optique) sont perméables au dioxyde de carbone mais ne permettent pas le passage des autres gaz ni des liquides et solides.

Une fois la sonde immergée, la pression partielle de CO<sub>2</sub> comprise entre le volume interne de la membrane et le milieu environnant s'égalise. Les tests effectués au laboratoire montrent que la sonde se met à l'équilibre avec le milieu en 30 à 40 minutes. Une variation rapide (inférieure au temps de stabilisation) de la chimie de l'eau du collecteur ne peut pas être observée par cette sonde. L'observation de la tendance générale d'évolution du paramètre mesuré est cependant fiable, mais pas la valeur absolue en instantané. Pour cette raison et pour limiter la consommation d'énergie liée à l'utilisation des piles, les mesures sont effectuées et enregistrées toutes les 3h.

- Suivi du CO<sub>2</sub> gazeux

Le CO<sub>2</sub> gazeux (en ppm) présent dans l'air interne du collecteur (regard S9) est suivi par un analyseur de CO<sub>2</sub> (Li-cor Li-820, Tableau 20). Celui-ci est également alimenté par la station située dans le regard et raccordé à la centrale d'acquisition. Dans ce dispositif, l'air circule à une vitesse de 1 l/min vers la cellule à infrarouge située à l'intérieur du capteur. Elle est couplée et à une pompe à air (réf : KNF NMP015B). Cette mesure est instantanée : 6 mesures faites pendant 5 min après 30 min de stabilisation du capteur.

- Suivi du pH, de la conductivité (C25) et de la température (T°C)

L'évolution du pH et de la conductivité électrique (C25, µS/cm) de l'eau drainée par le collecteur est suivie au moyen de deux multisondes (WTW-WQL-pH/Cond SET, Tableau 20, poste 6, Figure 34) programmées pour un enregistrement synchrone toutes les 5 minutes.



Figure 34: Instrumentation dans le regard S9 -Chauconin (77)

Trois mesures de température de l'eau sont effectuées dans le regard S9 : un thermomètre accordé au centre d'acquisition au poste 3 dans la Figure 34, deux thermomètres incorporés dans les deux multisondes au poste 6 dans la Figure 34.

- Suivi de précipitation

Les échantillons témoins de la précipitation de dépôt sont également installés (poste 2 ; Figure 34) dans le regard S9 et à l'exutoire S10. Ces portes d'échantillons sont des lames en verre, immergées dans l'eau du CD, et posées et récupérées mensuellement

pour peser la masse de dépôts accumulés dessus pendant 11 mois de février 2015 au janvier 2016.

## 5.5 Méthode d'analyse de l'eau et des solides

Les méthodes d'échantillonnage des phases liquides et solides prélevées à Chauconin et les caractéristiques des analyses réalisées aux laboratoires (LEESU à Paris pour l'analyse liquide ; IMN à Nantes pour l'analyse solide) sont décrites dans cette partie.

### a) Echantillonnage et analyse de la phase liquide

Dans le cadre de cette étude, le site test a fait l'objet de campagnes régulières d'échantillonnage des phases liquides à l'intérieur et dans l'environnement du système à la suite desquelles ont été réalisées des analyses au laboratoire LEESU à Paris. Le Tableau 21 présente la synthèse de la fréquence d'échantillonnage, et des types d'analyses effectuées au laboratoire. Les numéros indiqués se réfèrent aux stations d'échantillonnage localisées sur le site.

Chaque campagne de prélèvement de phase liquide se compose de :

- Mesure de paramètres in situ : pH, température ( $T^{\circ}\text{C}$ ) et conductivité ( $C_{25}$ ,  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) mesurés par un pH mètre du type WTW multi 350 i ;
- Echantillonnage pour le test de l'alcalinité ( $\text{Alc} = [\text{HCO}_3^-] + 2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$ ) par titration d'acide chlorique avec l'aide d'un titrateur de type METTLER TOLEDO T50. L'échantillon d'eau est conservé dans un tube (du type FALCON réf : 352098, type conique polypropylène) de 50ml à  $4^{\circ}\text{C}$  au frigo, et analysé dans les 48h ;
- Echantillonnage pour le test de chromatographie ionique (du type Metrohm 761 Compact IC) de cations majeurs ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) et anions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) : l'échantillon est filtré in situ par filtre préfabriqué (du type Whatman<sup>TM</sup> réf : 10 462 601 ; membrane d'acétate de cellulose ;  $0,45\mu\text{m}$  de maille) et seringue (du type HSW SOFT-JECT® Luer-lock, volume de 50ml) stérile et jetable, puis conservé dans un tube de 50ml (du type FALCON) à  $4^{\circ}\text{C}$  au frigo. L'analyse est faite dans les 72h.

b) Echantillonnage et analyse de la phase solide (dépôts carbonatés et sols)

De même, les matériaux du site pouvant interagir avec le collecteur ont été identifiés, prélevés et analysés :

- i) Matériaux constituant les sols in situ ;
- ii) Matériaux rapportés constituant la plateforme ;
- iii) Dépôts solides dans le collecteur drainant.

Le sol et les matériaux de la plateforme ont été échantillonnés au moyen de sondages carottés réalisés en déc. 2013, puis conservés dans un tube de PVC (Polychlorure de vinyle) au laboratoire IMN à Nantes pour les analyses suivantes :

- La teneur en eau (w%): la teneur en eau du limon a été mesurée in situ par un capteur de teneur en eau (Sonde réflectométrique du type Campbell Scientific CS616). Par contre, la teneur en eau du calcaire de Saint-Ouen et celle des matériaux de la plateforme ont été mesurés au laboratoire conformément à la norme française NF P94-049-1, le capteur in situ n'étant pas approprié dans ce type de matériau compact.
- Limites d'Atterberg ( $W_L$  et  $W_P$ ) : les tests de limite de liquidité et de plasticité ont été effectués sur les échantillons de limon naturel et de limon traité conformément à la norme française NF P94-052-1.
- Le pH – C25 (conductivité) : ces deux paramètres chimiques ont été déterminés sur l'ensemble des matériaux conformément à norme française NF ISO 10390.
- La teneur en carbonate (exprimée en  $\text{CaCO}_3\%$ ) : le pourcentage de carbonates contenu dans les matériaux prélevés a été déterminé au moyen de la méthode de calcimétrie conformément à la norme française NF ISO 10693.
- Les phases minérales : ont été analysées par diffraction des Rayon X (du type Bruker – AXS D8 Advance XRD) au laboratoire IMN à Nantes.

Tableau 21: Synthèse des caractéristiques d'échantillonnage et d'analyse de la phase liquide - Chauconin (77)

Echantillonnage			Analyse laboratoire		
Type de l'eau	Station	Fréquence	HCl - Titration (METTLER TOLEDO T50)	Chromatographie ionique (Metrohm 761 Compact IC)	
			Alcalinité	Cation	Anion
collecteur drainant	S9	mensuelle	*	*	*
	S1 à S10	saisonnaire	*	*	*
pluie	pluviographe	ponctuelle	*	*	*
la nappe	P5	annuelle	*	*	*
la plateforme	P1 et P2	annuelle	*	*	*
collecteur à l'amont	OHT	ponctuelle	*	*	*
Fossé terre revêtu	Pk 17,468 – voie 2	ponctuelle	*	*	*
Fossé béton préfabriqué à barbacanes	Pk 18,180 – voie 2	ponctuelle	*	*	*
	Pk 17,468 – voie 2	ponctuelle	*	*	*

NB : Colonne station d'échantillonnage est référé de ; \* analyse réalisée

Des prélèvements, analyses et observations régulières des dépôts présents dans le collecteur sont réalisés de manière mensuelle (regard S9) et saisonnière (le long du collecteur, S1 à S10) pour un suivi de la formation des dépôts. Le Tableau 22 présente la synthèse du type, de la fréquence d'échantillonnage, des analyses effectuées au laboratoire. Les numéros indiqués se réfèrent aux stations d'échantillonnage.

Les résultats issus des analyses des phases solides sont décrits dans le chapitre 6 pour avoir une reconnaissance des matériaux solides présents sur le site de Chauconin, et l'environnement chimique autour du collecteur testé.

## 5.6 Expérimentation du site

Dans le but de comprendre les facteurs liés à l'infrastructure et les processus qui conduisent à l'entartrage du collecteur, trois tests in situ ont été spécifiquement mis au point et déployés dans cette étude.

### 5.6.1 Test de l'évolution de la chimie lors de l'ouverture du regard S9

Objectif : déterminer si le collecteur drainant est un système fermé ou un système ouvert vis-à-vis de la présence de CO<sub>2</sub> atmosphérique afin de statuer sur cette source potentielle à l'origine des carbonates.

Hypothèse / Contexte : le collecteur est enterré, il correspond a priori à un système fermé. Cependant, les regards sont espacés tous les 80 m. En fonction de l'étanchéité des couvercles, chaque regard peut fonctionner soit comme un réservoir de gaz (système fermé), soit comme un système ouvert à l'air atmosphérique limité par la vitesse de diffusion de l'air du collecteur au regard (mauvaise étanchéité).

Matériels : analyseur de CO<sub>2</sub> gazeux (du type Li-cor Li-820, Tableau 20), sonde de CO<sub>2</sub> dissout (du type AquaMS sonde CO<sub>2</sub>, Tableau 20).

Schéma d'essai : la dynamique de transfert de CO<sub>2</sub> entre les différents milieux (interne – externe du regard) et de passage d'une phase à l'autre (gazeux –dissout) au niveau du regard S9 sur le site testé (Chauconin) est représentée à la Figure 35.

Protocole : fermeture et ouverture manuelle du couvercle du regard en alternance pendant 2 à 3 h en laissant l'acquisition du CO<sub>2</sub> dans le regard S9 en permanence.

Tableau 22: Synthèse de l'échantillonnage et de l'analyse de la phase solide - Chauconin (77)

Echantillonnage			Analyse laboratoire				
Type de matériau	Station	Fréquence	Teneur en eau	Limite d'Atterberg	Chimie	Calcimétrie	Diffraction rayon X
			NF P94-049-1	NF P 94 – 052 - 1	NF ISO 10390	NF ISO 10693	Bruker – AXS D8 Advance XRD
			% w	W <sub>L</sub>	pH - σ	% carbonates	Phase minérale
Dépôts	S9	mensuelle				*	*
	S1 à S10	saisonnnière				*	*
Limon	P1 à P4	ponctuelle	*	*	*	*	*
Calcaire (CSO)	P1, P3, P5	ponctuelle	*	*	*	*	*
Sous couche	P1, P2	ponctuelle	*		*	*	*
Couche de forme	P1, P2	ponctuelle	*		*	*	*
Limon traité	P1, P2	ponctuelle	*		*	*	*
Matériaux drainant	S9	ponctuelle			*	*	*
Grave traité	S9	ponctuelle			*	*	*

NB : Colonne station d'échantillonnage ; \* analyse réalisée



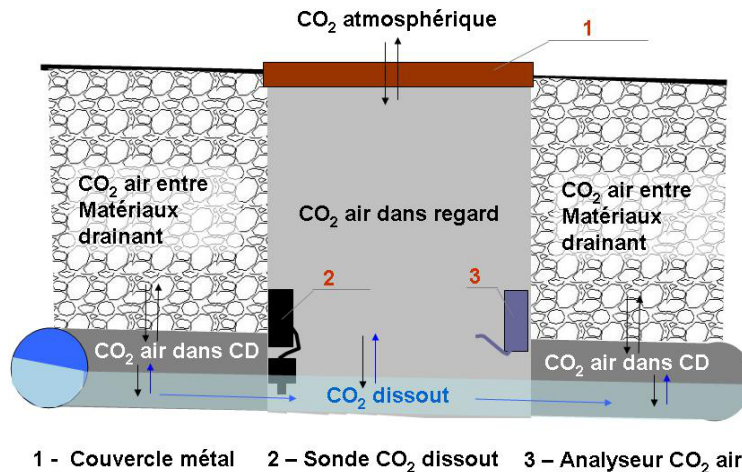


Figure 35 : Schéma du test in situ – dynamique de CO<sub>2</sub> air –dissout au niveau du regard

### 5.6.2 Test de l'évolution de la chimie au cours d'un épisode de la pluie

Objectif : déterminer le rôle d'un épisode de pluie sur le processus de formation de dépôts carbonatés.

Contexte : Le collecteur est enterré à 1,5 m de profondeur entre deux voies. Le toit du collecteur est couvert par les matériaux drainants perméables ( $10^{-4}$  m/s).

Nous formulons l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interaction entre la nappe et le collecteur. La couche de sol traitée est quasiment imperméable ce qui déconnecte le collecteur drainant de la nappe de Calcaire de Saint-Ouen au niveau du collecteur testé. Etant donnée la configuration du terrain de Chauconin, l'écoulement issu de la pluie suit plusieurs trajets avant de rejoindre le collecteur. Nous formulons l'hypothèse que le phénomène d'entartrage peut être particulièrement lié à l'un ou l'autre des types d'écoulements en fonction de la perméabilité des matériaux traversés mais leurs contributions quantitatives restent à déterminer.

Matériels : analyseur de CO<sub>2</sub> gazeux, sonde de CO<sub>2</sub> dissout, multisonde (WTW-WQL-pH/Cond SET, Tableau 20).

Schéma d'essai : même installation de la multisonde et des capteurs de CO<sub>2</sub>, dans le regard S9 (Figure 34).

Protocole : les principales étapes du protocole d'essai sont réalisées dans le but de capter le maximum l'évolution chimique de l'eau drainée vis à vis d'un épisode pluvieux. Elles sont listées ci-dessous: échantillonnage de l'eau dans le regard avant, au cours (2h à 8h après le début de la pluie), et après (2 à 3 jours) la pluie. Pendant ces étapes, le CO<sub>2</sub> de l'air et dissout, le PH et la conductivité sont enregistrés toutes les 5 min.

### 5.6.3 Test d'estimation de la vitesse de formation des dépôts carbonatés

Objectif : 1) déterminer la vitesse mensuelle de formation de dépôts carbonatés afin d'estimer la quantité annuelle potentielle de dépôts accumulés à l'intérieur du collecteur ; 2) suivi de la nature des phases minérales précipitées.

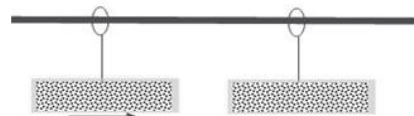
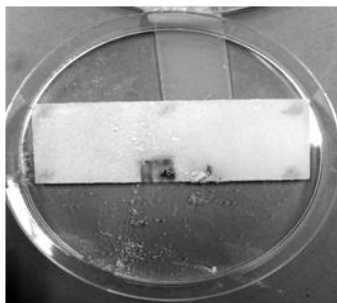
Contexte : d'après les retours d'expériences (REX) issus de plusieurs visites de terrain faisant suite à la construction de la ligne et à l'opération d'hydrocurage, on a observé que les dépôts calcaires apparaissent assez rapidement à l'échelle de quelques mois. Le phénomène est visuellement rapide, mais la valeur de cinétique in situ reste inconnue. Il est donc nécessaire de la quantifier dans un objectif de prévision de l'effort de maintenance.

Matériels : analyseur de la phase de CO<sub>2</sub> gazeux, sonde de CO<sub>2</sub> dissout, multisonde, portes-échantillons en verre (Dimension épaisseur\* largeur \* longueur : 0,1 \* 2,6 \* 7,6 cm), ficelles et pinces plastiques.

Schéma d'essai : l'installation des portes-échantillons en verre est illustrée Figure 36.

Protocole : Immerger par suspension les portes-échantillons (2 par mois) dans le regard du collecteur drainant au moyen de ficelles et pinces plastiques, et puis relever les portes - échantillons au bout d'un mois, sécher (étuve de 60°C pendant 3 jours) et peser la masse totale ayant augmenté sur les portes-échantillons en laboratoire LEESU à Paris.

Extension de l'essai : immersion des porte-échantillons en verre dans l'eau pendant des durées différentes puis mesure de la masse de dépôts carbonatés formés sur différentes lames en verre afin d'estimer la vitesse d'entartrage globale. Cette vitesse in situ sera comparée avec les valeurs retrouvées dans la littérature afin de vérifier l'existence de catalyseurs ferroviaires potentiels (gypse, vibration roue-rail et etc.).



**Porte d'échantillon en verre**  
(E\*L\*L=0.1\*2.6\*7.6cm)

 La calcite est précipitée sur la surface des portes-échantillons

Figure 36: Test in situ – mesure de la masse des dépôts au cours du temps

## 5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on décrit en détails la méthode et les matériels de d'instrumentation du collecteur drainant (CD\_tronçon2) entartré, et les expérimentations effectués sur le site pilote de Chauconin qui nous permettra de construire une base de données pour atteindre l'objectif suivant:

- analyser les processus et causes (i.e. source de calcaire) d'entartrage en contexte ferroviaire;
- quantifier la contribution des facteurs aggravants (i.e. différents écoulements produits dans le bassin versant ferroviaire du fait d'une pluie);
- estimer la quantité d'entartrage annuel tout le long du CD\_tronçon2;
- développer un modèle conceptuel pour représenter un cas d'étude.

## Chapitre6 Résultats

Ce chapitre présente les résultats des différentes expérimentations réalisées sur les sites expérimentaux présentés précédemment. La première section du chapitre concerne le site de Chauconin, la seconde les analyses ponctuelles menées sur les 8 tunnels (sites flashes) présentés au chapitre 3.

### 6.1 Résultat de l'instrumentation et des expérimentations sur le site pilote de Chauconin

Nous présentons successivement la caractérisation du sol du site de Chauconin, la dynamique et la composition des eaux qui y circulent ainsi que dans le système de drainage, la caractérisation des dépôts récoltés dans le caniveau drainant.

#### 6.1.1 Résultats sur le compartiment sol

##### 6.1.1.1 Phases minérales du sol encaissant et des matériaux rapportés

Dans ce paragraphe, les phases minérales et les caractéristiques physico-chimiques des matériaux constitutifs du système étudié sont présentées brièvement. La Figure 37 rappelle les positions des sondages géotechniques (P1 à P4) réalisés autour du drain instrumenté : un collecteur drainant (CD) de 800 m comprenant neuf regards et un exutoire (S1 à S10).

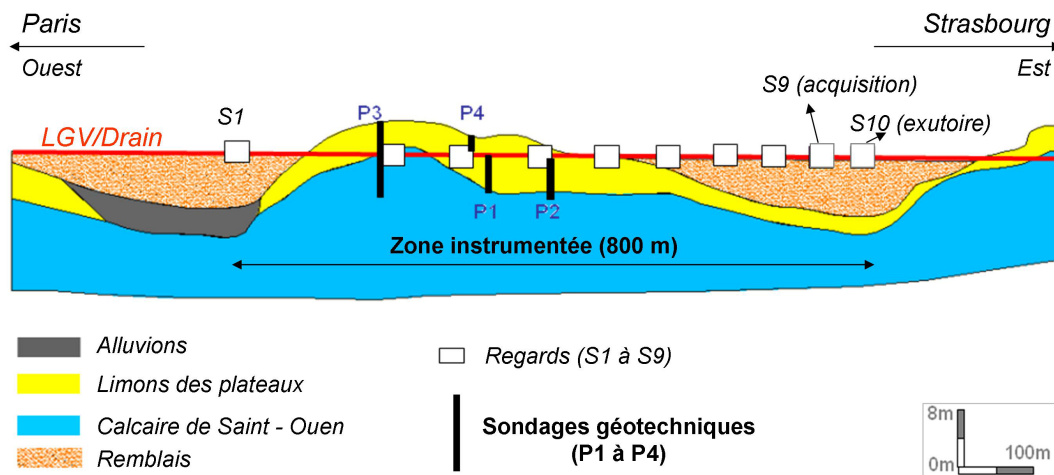


Figure 37 : Coupe du sol le long de la voie TGV, position des sondages géotechniques

Les sondages P1 et P2 (sondages carottés) sont réalisés dans la plateforme ferroviaire; P3 (sondage carotté) et P4 (réalisé à la tarière) sont en crête dans le sol en place : CSO (calcaire de Saint-Ouen) pour P3 et limons pour P4. Les échantillons du sol et des matériaux de différentes couches de la plateforme ferroviaire proviennent de ces quatre sondages. A titre illustratif, des photos de la carotte P1 sont présentées dans la coupe transversale du CD (Figure 38). Les phases minérales ont été analysées à l'Institut de Matériaux de Nantes (IMN) par diffraction Rayon-X (DRX) et sont présentées dans le Tableau 23.

Les Annexes 1 à 3 rassemblent également des informations complémentaires relatives à ces sondages. L'annexe 1 présente deux coupes transversales de la voie, du sol et des dispositifs des drainages au droit des sondages P1 et P2. Ces coupes sont calées grâce à la campagne topographique. L'annexe 2 présente les photos des trois sondages carottés P1, P2 et P3 et leur description, la profondeur des couches des matériaux et du sol. Les diffractogrammes sont présentés dans l'annexe 3.

A partir des résultats géotechniques et des analyses de diffraction (Tableau 23), une description qualitative des matériaux encaissants a été effectuée depuis la surface, de la voie 2 (Strasbourg-Paris) à la voie 6 (voie de service), (Figure 38) :

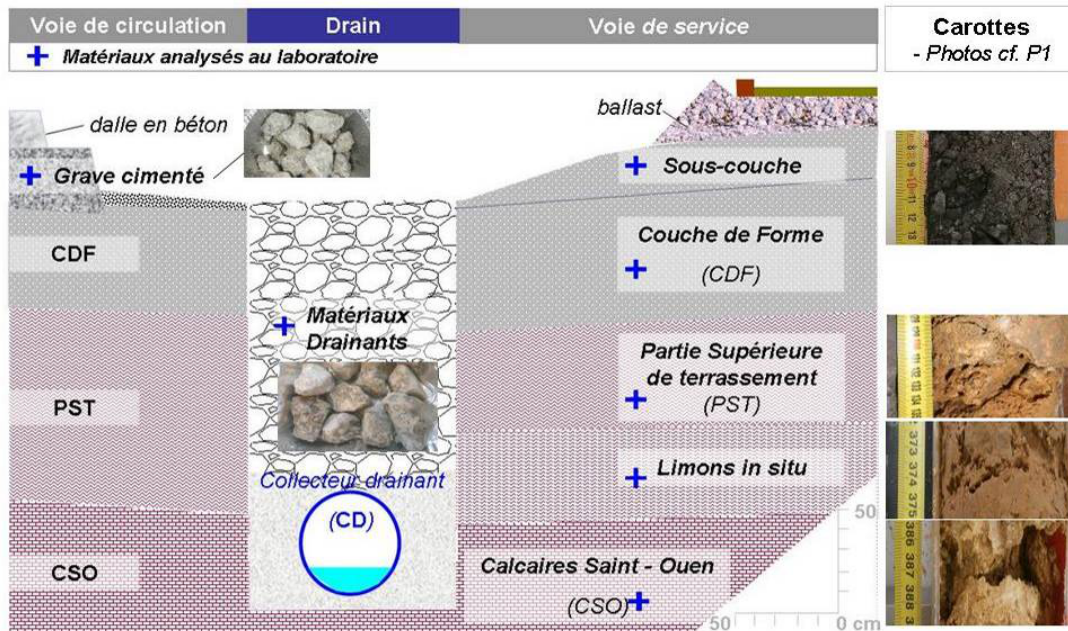


Figure 38 : Coupe transversale du CD avec affichage des photos des matériaux encaissants

La couche de grave cimentée (28 cm d'épaisseur), située sous la dalle béton présente des graviers de 1 à 2 cm, de couleur gris - beige. Elle se compose de calcite magnésium, dolomite et quartz.

Les matériaux de la sous-couche et de la couche de forme (CDF) sous la voie de service sont identiques. L'ensemble des deux couches fait 90 cm d'épaisseur au lieu des 73 cm indiqués dans le référentiel IN3278 (SNCF, 2006). Le matériau est fracturé, de couleur gris foncé. Le diamètre du gravier constitutif est d'environ 1 cm. Le matériau se compose de calcite, dolomite, gypse, quartz et illite.

Tableau 23: Synthèse des phases minérales (DRX) dans les matériaux in situ –Chauconin (Carottages P1 à P3)

Type de couche	Phase minérale	Formules
Sous couche	Calcite	$\text{CaCO}_3$
	Dolomite	$\text{CaMg}_{0,77}\text{Fe}_{0,23}(\text{CO}_3)_2$
	Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	Quartz	$\text{SiO}_2$
	Illite	$2\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 24\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
CDF (couche de forme)	Pareils que pour la sous couche	
PST (partie supérieur de terrassement) : limon traité à la chaux de 1 à 2%	Montmorillonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,8}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Quartz	$\text{SiO}_2$
	Calcite	$\text{CaCO}_3$
Sol support-Limons	Montmorillonite	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,8}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Illite	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$
	Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Quartz	$\text{SiO}_2$
	Calcite	$\text{CaCO}_3$
Sol support-Calcaire CSO	Montmorillonite, Illite, Quartz et Calcite (pareil que limons)	
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Gravier cimenté	Calcite magnésium	$\text{Mg}_{0,23}\text{Ca}_{0,77}\text{CO}_3$
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Quartz	$\text{SiO}_2$
Matériaux drainant (MD-CD)	Quartz	$\text{SiO}_2$
	Calcite	$\text{CaCO}_3$

La partie supérieure du terrassement (PST : 0,5 m d'épaisseur) est une couche de limons traités à 1 à 2 % de chaux, argileuse, bien compactée, de couleur marron. Cette couche est beaucoup moins épaisse que la valeur (1m) indiquée dans le référentiel IN3278 (SNCF, 2006). Elle se compose de montmorillonite, de quartz et de calcite. Aucune trace de chaux n'a été identifiée dans les échantillons. A noter

que la sensibilité de la méthode de mesure utilisée ne permet pas la détection des phases minérales inférieures à 5%.

La couche de sol support en limons est très argileuse, de couleur marron foncé. Elle se compose de montmorillonite, kaolinite, illite, quartz et calcite.

La couche de sol support en calcaire de Saint-Ouen est très marneuse, de couleur beige. Elle se compose de dolomite, calcite, montmorillonite, kaolinite, illite et quartz.

Les matériaux drainants (1,5 m d'épaisseur) situés au-dessus des fentes du CD mesurent 3 à 5 cm de diamètre. De couleur blanc – gris, ils se composent de calcite et quartz.

En résumé, les sondages géotechniques et leurs analyses confirment que les matériaux mis en place sont cohérents avec les prescriptions des référentiels de SNCF Réseau. La couche de forme au niveau de la voie de service est constituée du même matériau que la sous-couche et non d'un matériau rapporté comme c'est le cas pour les voies LGV.

#### *6.1.1.2 Caractéristiques physiques du sol in situ et des matériaux rapportés*

Les échantillons issus des sondages carottés P1, P2, P3 ont fait l'objet des analyses classiques GTR (Guide Technique Remblai) (LCPC, 2006) pour les 5 paramètres suivants : % de fines, teneur en eau (w%), limites plastique (WP) et liquide (WL) et perméabilité. Elles sont présentées dans le Tableau 24.

Les valeurs théoriques du % de fines et de la perméabilité proviennent des divers documentations relatives à la construction de la ligne (LCPC, 1992; SNCF, 2006; SNCF, 1999). La teneur en eau est mesurée in situ et au laboratoire. Les limites de WP et WL sont mesurées au laboratoire par l'essai d'Atterberg selon la Norme Afnor 1FP94-051. La granulométrie indiquée provient de la fiche technique ST N\*590B (SNCF, 1999). La sous-couche, est constituée de 17,5% jusqu'à 45,8% de gravier (> 20 mm). Les matériaux drainant sont des granulats 0/35 comportant moins de 1% des fines. Le grave cimenté est de granularité de 0/14 (SNCF, 2006).

D'après ces informations, le Calcaire de Saint-Ouen (CSO) constitue un matériau perméable, avec une perméabilité de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s. Le limon et les matériaux de la plateforme (sous-couche, couche de forme, limons traités et gravier cimenté) sont peu perméables, avec une perméabilité inférieure à  $10^{-7}$  m/s. Par ailleurs les matériaux drainants (MD) au-dessus du collecteur drainant (CD) sont également perméables avec une perméabilité de l'ordre de  $10^{-4}$  m/s.



**Tableau 24: Synthèse des analyses au laboratoire des matériaux in situ –Chauconin (P1 à P3)**

Matériaux	% fines	Teneur en eau w%	Limites d'Atterberg		Perméabilité m.s <sup>-1</sup>
			WP	WL	
Sous couche	~ 4,5% (< 40 µm)	~2,8%	NR	NR	< 1 0 <sup>-7</sup>
Couche de forme	~ 4,5% (<40µm)	~4,5%	NR	NR	< 1 0 <sup>-7</sup>
PST – limons traités	~ 90% (<50µm)	~17,6%	NR	NR	7* 10 <sup>-8</sup> - 10 <sup>-10</sup> (Dysli, 2000)
Sol support-Limon (Limon A2)	35% à 100% ( <80µm)	~22%	~27%	~42%	10 <sup>-6</sup> - 5* 10 <sup>-9</sup> (Fang, 2013)
Sol support-Calcaire CSO (Calcaire marneuse A4)	35% à 100% ( <80µm)	~42%	~32%	~72%	5* 10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-5</sup> (Fang, 2013)
Gravier cimenté	NR	NR	NR	NR	< 1 0 <sup>-7</sup>
Matériaux Drainant – CD	~ 1% (<100µm)	NR	NR	NR	> 10 <sup>-4</sup>

Les limons, le calcaire de Saint-Ouen et limons traités sont riches en fines inférieures à 110 µm, taille de la maille du géotextile placé autour du système de drainage. Ils comprennent 35%, 35% et 90% de fines respectivement. Les matériaux drainants et les matériaux de la sous-couche et la couche de forme (CDF) ont peu de fines : environ 1% de fines inférieures à 100 µm dans le matériau drainant, et de 4,5% des fines inférieure de 40 µm dans la sous-couche et la CDF.

La sous-couche et la CDF avaient une teneur en eau réduite le jour de l'expérimentation in situ le 12/12/2013 : ~ 2,8% et ~ 4,5% respectivement. Le limon naturel et le limon traité avaient une teneur en eau modérée : ~ 22% et ~ 17,6% respectivement. Le calcaire (CSO) avait une teneur en eau plus élevée de 42%.

La limite plastique d'Atterberg du limon est de 27% de teneur en eau, et la limite liquide est de 42%. Le CSO a des limites plastiques et liquides plus élevées que le limon : ~ 32% (WP) et ~ 72% (WL) respectivement.

Selon le guide technique GTR 92 pour la réalisation des remblais et des couches de forme (NF P11-300, 1992), le limon est de classe A2 avec une plasticité modérée ( $I_p = WL - WP$  ;  $I_p < 25$ ), riche en fines inférieures à 80 µm (<65%) alors que le CSO qui est marneux, avec une plasticité élevée et riche en fines inférieures à 80 µm (<65%) est de classe A4 ( $I_p > 40$ ). Ces matériaux étant proches de leurs états plastiques, avant l'emploi dans la plateforme ferroviaire, il est nécessaire d'envisager un traitement afin de renforcer leur résistance mécanique.



### 6.1.1.3 Caractéristiques chimiques du sol in situ et des matériaux rapportés

Afin de caractériser les conditions chimiques de l'environnement autour du CD, les caractéristiques chimiques des matériaux sont mesurées également au laboratoire. Les paramètres analysés à partir des échantillons carottés sont : le % massique de CaCO<sub>3</sub>, le pH, la conductivité à 25°C : C25. Le Tableau 25 présente la synthèse des résultats en indiquant les valeurs minimum et maximum obtenues sur l'ensemble des échantillons carottés.

Tableau 25: Synthèses des caractéristiques chimiques des matériaux solides –Chauconin (P1 à P3)

Type de couche	CaCO <sub>3</sub> % (masse)	Le pH	C25- $\mu\text{S.cm}^{-1}$
Sous couche	~ 80%	~ 8,2	~ 1330
Couche de forme (CDF)	~ 85%	~ 8,1	~ 1290
PST – limons traités	9% ~ 14%	9 ~ 9,6	300 ~ 600
Sol support-Limons	7% ~ 10%	7,8 ~ 8,4	200 ~ 300
Sol support-Calcaire CSO	45% ~ 70%	7,9 ~ 8,2	100 ~ 270
Gravier cimenté	~ 80%	8,8 ~ 9,8	~ 110
MD – CD	>90%	~ 8,5	~ 160

Les résultats obtenus mettent en évidence que à l'exception des limons, les matériaux présents dans l'environnement proche du collecteur drainant sont essentiellement carbonatés, notamment les matériaux situés dans la partie supérieure (au-dessus des fentes du CD) qui contiennent plus de 80% de carbonates. Parmi ces matériaux, à l'exception des graves cimentés et des limons traités qui sont très alcalins (pH 9,6 à 9,8); tous les autres matériaux ont un pH d'environ 8, typique d'un milieu carbonaté. Les sous-couche et couche de forme dans lesquelles la présence de gypse a été mise en évidence présentent une conductivité électrique (C25) très élevée de 1300  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  environ. Les autres types de matériaux qu'ils soient limoneux ou carbonatés présentent une faible conductivité C25 inférieure à 300  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ .

Le limon traité de la couche de la partie supérieure du terrassement (PST) est légèrement plus carbonaté (9 à 14%) en comparaison avec le limon non remanié, prélevé in situ et non traité (7 à 10%). Il présente également un pH et une C25 beaucoup plus élevés (pH > 9 ; C25 > 300  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ). Ces différences de caractéristiques chimiques entre limons traités et limons naturels peuvent être liées au traitement à la chaux de ces matériaux pour leur assurer des caractéristiques mécaniques acceptables.

## 6.1.2 Résultats sur le compartiment eau

### 6.1.2.1 Evolution temporelle des variables physiques et chimiques : synthèse des observations

La dynamique (physique et chimique) des écoulements dans le collecteur drainant instrumenté (CD\_ tronçon2) est suivie par l'acquisition en continu dans le regard S9 des 23 paramètres physico-chimiques listés dans le Tableau 26. Les périodes d'acquisition comme celles des interruptions dues à des dysfonctionnements de capteurs, les fréquences d'acquisition sont aussi mentionnées dans ce tableau paramètre par paramètre.

L'évolution de la composition chimique au cours du temps de l'eau du CD\_ tronçon2 a été suivie également par cinq campagnes ponctuelles le long du CD du regard S1 à l'exutoire S10 (Figure 37), et par un suivi mensuel en S9 entre mars 2015 et mars 2016.

Les conditions générales des cinq campagnes d'échantillonnage le long du CD\_ tronçon2 sont synthétisées dans le Tableau 27.

Ce tableau inclue la date, le niveau de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen (relevée dans le piézomètre P5) et de l'eau dans la plateforme (relevé dans le piézomètre P1), le débit dans le CD, la météo, la température atmosphérique et les jours après la pluie précédent.

Enfin des prélèvements ponctuels de l'eau de pluie, d'eau de ruissellement piégée dans des flaques d'eau sur la plate forme, d'eau des piézomètres P1 et P2, d'eau de la nappe du Calcaire de St-Ouen (piézomètre P5) à fin d'analyse de leur composition chimique. Par ailleurs, de l'eau de trois autres dispositifs de drainage situés à proximité du site expérimental a également été analysée au moins une fois dans le but de caractériser le contexte chimique général des eaux sur le site.

Ces trois dispositifs sont situés dans le déblai D503 et sont le fossé terre revêtu (FTR), le fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB) et le collecteur drainant servant à la comparaison (CD\_ tronçon1), présentés dans la description du site d'étude. Ces trois dispositifs sont situés dans le déblai D503 et sont le fossé terre revêtu (FTR), le fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB) et le collecteur drainant servant à la comparaison (CD\_ tronçon1), présentés dans la description du site d'étude.



Tableau 27 : Synthèse des conditions environnementales des 5 campagnes d'échantillonnage - Chauconin

Campagne (t1 à t5)	Altitude de l'eau au piézomètre P5 (mNGF)	Altitude de l'eau au piézomètre P1 (mNGF)	Débit dans le CD (l.s <sup>-1</sup> )	Journée soleil/pluie	T°C de l'air au moment de l'échantillonnage (°C)	Nombre de jours depuis la dernière pluie (j)
t1 : 12/12/2013	106,5	NA	NA	soleil	-4	5
t2 : 02/06/2014	107	pas d'eau	NA	soleil	21	5
t3 : 19/11/2014	107	99,5	0,080	soleil	6	2
t4 : 17/03/2015	108	100,8	0,023	soleil	0	11
t5 : 08/07/2015	106,5	pas d'eau	0,005	soleil	25	13
NB : NA- données non disponibles						

Tableau 28 : Présentation synthétique des prélèvements et analyses complémentaires menées sur le site de Chauconin

Type d'eau/position	Nombre des Campagnes	Nombre d'échantillon/campagne	Date campagne
Eau de pluie	3	1	03/12/2015; 22/01/2016; 19/02/2016
Eau interne à la plateforme (Piézomètres P1 et P2)	4	1	17/02/2015; 17/03/2015; 22/01/2016; 23/03/2016
Eau de ruissellement de plateforme (flaques d'eau, lendemain de pluie)	1	2	23/09/2015
Nappe du calcaire de de Saint Ouen (piézomètre P5)	5	1	17/02/2015; 17/03/2015; 08/07/2015; 22/01/2016; 23/03/2016
CD_comparé (déblai D 503)	1	1	08/07/2015
Fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB) (déblai D503)	2	1	12/12/2013; 17/03/2015
Fossé terre revêtu (FTR) (déblai D503)	1	1	12/12/2013

Les informations générales (date, type d'eau et nombres d'échantillons) de l'ensemble de ces campagnes ponctuelles sont présentées dans le Tableau 28.

Les résultats des analyses des échantillons prélevés lors de ces différentes campagnes sont présentés en annexe 4. Ils incluent la balance ionique (BI%) de chaque analyse. Les informations relatives à la qualité analytique des analyses et aux incertitudes expérimentales ont été présentées dans le chapitre 2.

La suite du chapitre présente de manière détaillée les résultats des acquisitions en continues réalisées sur le site, d'abord pour les paramètres physiques, puis chimiques.

### 6.1.2.2 Précipitations

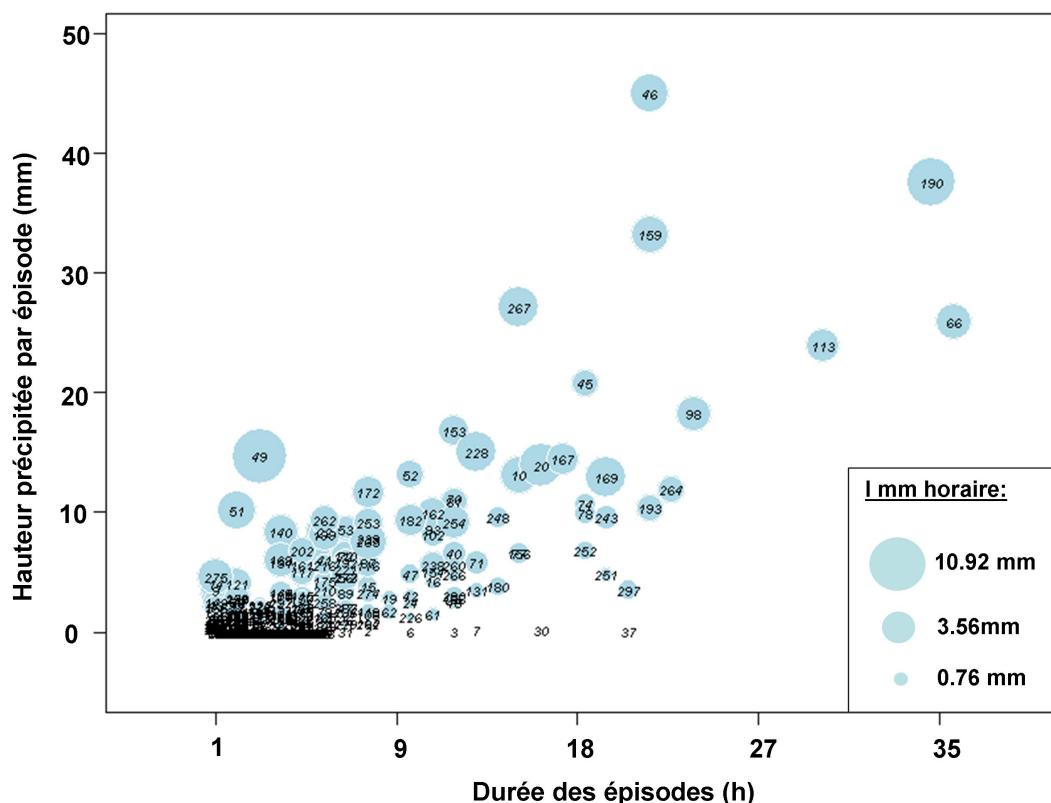
La hauteur des précipitations est mesurée sur le site par un pluviomètre à auget basculeur. Les données sont disponibles sur 81% du temps d'exposition. Il est important de pouvoir séparer les évènements pluvieux les uns des autres. Le critère retenu est l'absence de basculement d'auget pendant au moins trois heures. Compte tenu des caractéristiques de perméabilité du matériau drainant, cette durée permet de séparer les pics de débits des évènements à la sortie du caniveau drainant.

A partir de ce critère, 298 épisodes pluvieux sont identifiés sur la période d'acquisition de mars 2014 à mai 2016. Le Tableau 29 présente la distribution de ces 298 épisodes pluvieux classés par catégorie en fonction de la durée et de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode.

Tableau 29 : Distribution des épisodes de la pluie selon la durée (h) et cumul de la hauteur (mm)

Catégorie Durée	Catégorie Hauteur	H1	H2	H3	H4	H5	H6	Somme par ligne
	Cumul mm / épisode Durée en heure	mm ≤ 1	1 < mm ≤ 2	2 < mm ≤ 5	5 < mm ≤ 10	10 < mm ≤ 15	15 < mm	
t1	Durée ≤ 1h	114	14	13	0	1	0	142
t2	1h < Durée ≤ 2h	5	7	3	0	1	0	16
t3	2h < Durée ≤ 3h	4	7	5	3	0	0	19
t4	3h < Durée ≤ 6h	12	11	15	13	0	0	51
t5	6h < Durée ≤ 12h	6	5	12	15	5	1	44
t6	12h < Durée ≤ 24h	2	0	3	6	7	5	23
t7	Durée > 24h	0	0	0	0	0	3	3
Somme par colonne		143	44	51	37	14	9	298

La Figure 39 présente de manière synthétique les 298 épisodes enregistrés ; l'axe des abscisses présente la durée des épisodes de pluie (min.) ; l'axe des ordonnées le cumul de hauteur d'eau (mm) d'un épisode pluvieux; le diamètre des bulles indique l'intensité moyenne maximale sur une heure (mm.h<sup>-1</sup>) ; le numéro affiché sur les bulles est le numéro de l'épisode de la pluie.



Distribution des intensités moyennes maximales horaires par évènement						
Quantile %	0%	25%	50%	75%	90%	100%
Imm horaire	0.00	0.25	0.76	1.52	3.56	10.92

Figure 39 : Représentation synthétique des évènements pluvieux observés-Chauconin

NB : diamètre de bulles- intensité moyenne maximale sur une heure,  
le numéro affiché sur la bulle est celui de l'épisode

### 6.1.2.3 Nappe

Cinq piézomètres (P1 à P5, Figure 37) ont été installés en déc. 2013 sur le site de Chauconin après ces cinq sondages géotechniques: P5 est localisé dans le déblai amont (D503). Les 4 autres (P1 à P4) sont installés à proximité du CD\_tronçon 2, à 1,5 km de P5.

P5 permet de suivre l'évolution de la nappe du calcaire de Saint-Ouen (CSO). P3 son analogue installé dans le talus de déblai du CD\_tronçon2 est resté sec pendant toute la durée de la campagne de mesure. P4 a été installé dans la couche de limons pour rechercher une éventuelle nappe perchée, mais est également resté sans eau. P1 et P2 captent de l'eau présente dans la plateforme de la piste.

La Figure 40 illustre l'évolution annuelle du niveau d'eau dans les trois piézomètres : P5, P1 et P2, ainsi que la pluie et le débit du CD\_tronçon2. On observe que :

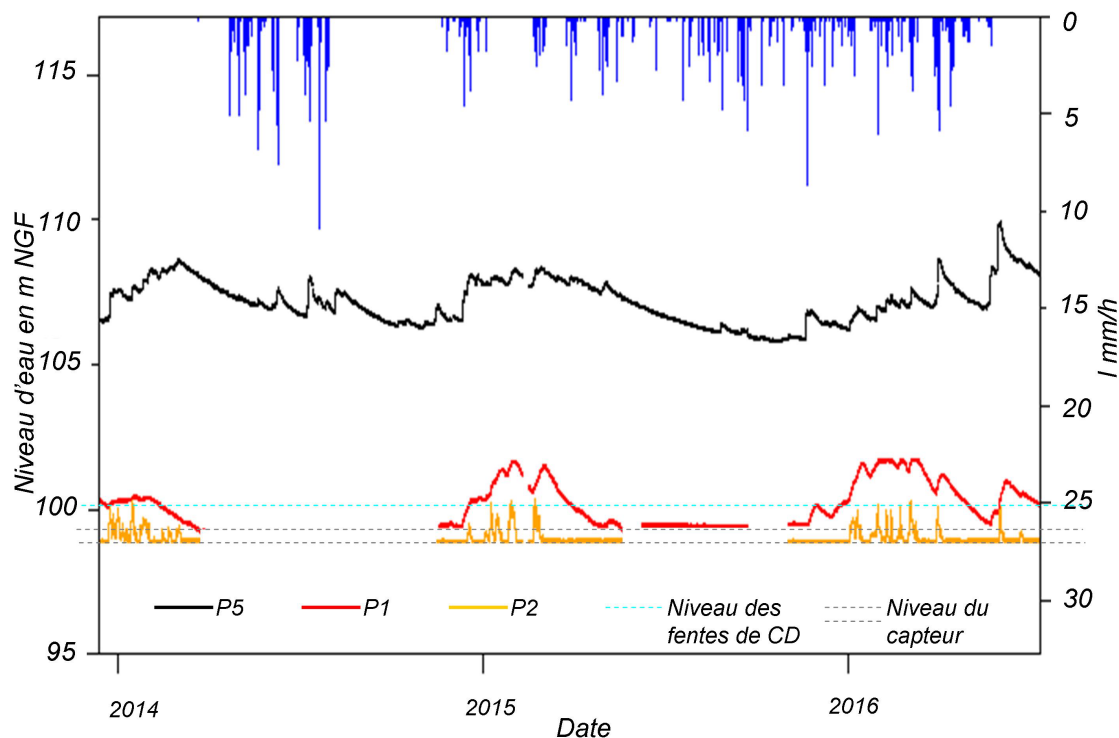


Figure 40 : Dynamique des précipitations et des hauteurs d'eau dans les piézomètres P1, P2 et P5 - Chauconin

NB : niveau d'eau capté dans la plateforme dans les piézomètres P1 et P2 ; niveau d'eau dans le piézomètre P5 (déblai D503) dans la nappe du Calcaire de Saint-Ouen (CSO); pas d'eau dans P3 (I CSO) et P4 (limons) en crête de déblai D505

Le niveau de l'eau à P5 varie de 3 m au cours de l'année. En hiver, la nappe est haute – jusqu'à 3 m de profondeur sous le terrain naturel (TN)-, et commence à descendre à mi-printemps. Il y a une tendance à la baisse jusqu'à mi-automne. En plein été lorsque le niveau est bas on observe trois grandes variations rapides de plus d'un mètre de haut, pendant 2 à 3 semaines. Le niveau peut alors atteindre 4 m sous le TN, à proximité de l'interface limon - calcaire. Ces observations sont cohérentes avec ce qui a été observé avant la construction de la ligne par les sondages et pelles mécaniques (détails dans le chapitre 4 : présentation du site).

En considérant le niveau d'entrée de l'eau dans le fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB : 105,7 m NGF) et celui de CD\_tronçon1 (107 m NGF), cette nappe

du calcaire de Saint-Ouen (position P5) est drainée par le FBPB toute l'année et par le CD\_tronçon1 sauf à l'automne pendant la durée de nos observations :

Le niveau d'eau en P1 et P2 (dans la plateforme de la piste) montre une dynamique annuelle similaire à celle de P5 : le niveau est maximal en hiver et diminue en été où il est inférieur à la profondeur maximale du piézomètre. Les piézomètres P1 et P2 montrent des dynamiques différentes : P1 montre des variations lentes et lisses (évolution de 1,5 m pendant des semaines) alors que P2 montre des variations rapides sous forme de pics (évolue 1,5 m pendant des jours).

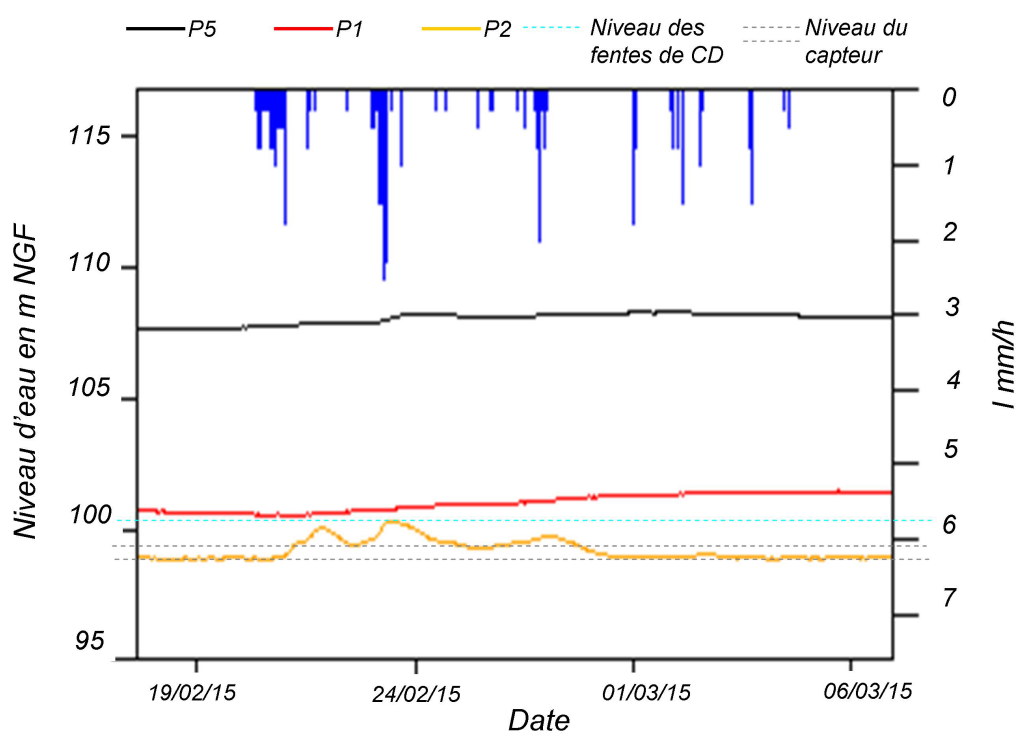


Figure 41 : Dynamique de la pluviométrie et des hauteurs dans les piézomètres sur le site de - Chauconin - Chroniques de mars 2015

Ces variations rapides sont synchrones avec celles observées sur le débit du collecteur drainant instrumenté après avoir fait un zoom des trois semaines de données en hiver (du 15/02/2015 au 07/03/2015) : lors d'une pluie, le niveau d'eau de P2 et le débit du CD varient pendant 2 à 3 jours. Ce niveau d'eau n'a pas été relié avec une nappe mais plutôt à un remplissage du tube PVC du piézomètre par infiltration peut-être favorisé par une hétérogénéité des matériaux lors de leur mise en place dans la zone de P2.



En considérant le niveau de l'entrée d'eau du CD<sub>tronçon2</sub> (100,56 m NGF à la position P1), cette eau d'infiltration dans la piste alimente le CD en continu en hiver. Le niveau piézométrique dans P1 montre toujours une dynamique assez proche de celle de P5 : du fait de la pluie, le niveau d'eau souterraine augmente progressivement à sa valeur maximale en deux semaines ( Figure 41). P5 montre une dynamique saisonnière et pluriannuelle qui laisse penser qu'il s'agit de la nappe régionale du Calcaire de Saint-Ouen. Dans la piste côté P1 et P2, le fonctionnement est moins clair, et semblent au contraire capter des infiltrations en piste.

#### 6.1.2.4 Débit du CD<sub>tronçon2</sub> – Zone d'acquisition

Le débit à l'exutoire du collecteur drainant entre 2014 et 2016 (Figure 42) présente en continu un débit de base d'environ 0,02 l/s après la pluie.

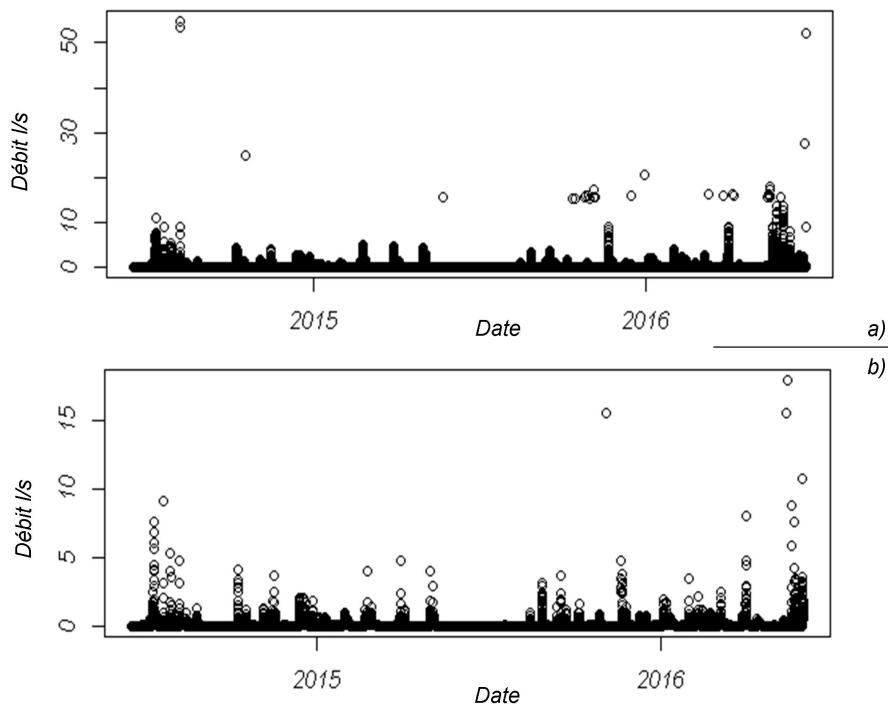


Figure 42 : Mesure des débits du collecteur drainant entre 2014 et 2016

NB : a) débit mesuré de pas de temps de 15 min (avant le 23/11/2014) et 5 min ; b) débit horaire en moyenne des mesures de tous les 5 min ou 15 min

A celui-ci se superposent des hydrogrammes pouvant atteindre, pendant la période de suivi jusqu'à 60l/s (Figure 42a). La hauteur minimale mesurable au-dessus du déversoir est de 4mm (débit de 0.5 ml.s<sup>-1</sup>) ; pour toutes les hauteurs inférieures mesurées, le débit pris en compte sera de 0.5 ml.s<sup>-1</sup>.

Ces très faibles débits sont observés uniquement durant les très longues périodes de temps sec, en période estivale, dépassant trois semaines.

#### 6.1.2.5 Relation Pluie- débit

Lors d'un évènement pluvieux, l'hydrogramme et l'hyétogramme sont reliés (la Figure 43 présente à titre d'illustration les relations pluie débit sur la période allant du 05/07/2014 au 15/07/2014). Cette période en continu a été choisie car elle se compose des trois types de relation pluie-débit observés pendant les deux ans de l'acquisition :

- type 1 (épisode isolé): courbe de crue et de décrue complète ;
- type 2 (épisodes en série): succession de courbes de crue et de décrue sans retour au débit de base;
- type 3 (absence de débit) : évènement pluvieux ne donnant pas lieu à une variation de débit dans le CD (Figure 43 pic 1 et 3).

Lorsqu'il y a production de débit (pluie « effective »), un délai maximum de 3h entre le pic de pluie et le pic de débit est observé. Cette faible durée indique que la dynamique de l'eau dans le système étudié est rapide.

D'après le zoom sur 6 évènements pluvieux effectifs (Figure 43), on observe qu'il se produit deux types d'écoulements dans le CD à des échelles de temps différentes :

- un écoulement rapide (Qr) qui arrive moins de 3 heures après le pic de débit ;
- un écoulement lent (Ql) qui arrive, selon les épisodes, à 10h  $\pm$ 2 h après le pic de débit.

Cette dynamique de deux écoulements Qr-Ql du terrain est observée dans l'ensemble des épisodes de pluie « effective ». Deux autres extraits mensuels de la relation Pluie- Débit avec zoom sur les pics de l'hydrogramme sont donnés dans l'annexe 5. Ils complètent la Figure 43 pour la réponse Pluie-Débit en été (08/2015) et en hiver (02/2015).

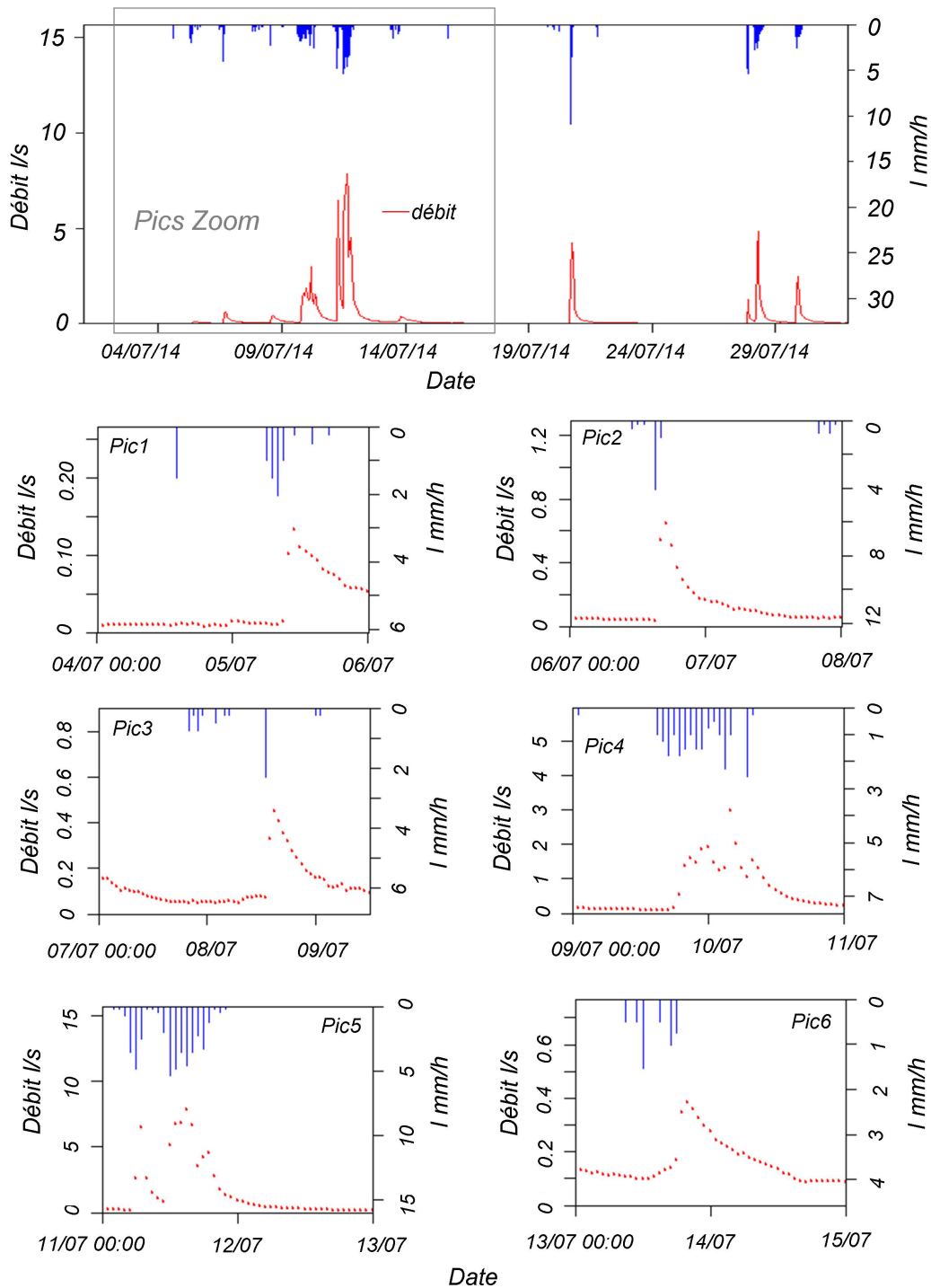


Figure 43 : Exemples de relations pluie- débit. Zoom sur les 6 pics de l'hydrogramme--juillet 2014 Chauconin

Cette dynamique de deux écoulements Qr-QI dans le terrain drainé par le collecteur drainant instrumenté est confirmée par l'analyse de l'hydrogramme avec la méthode de la pente constante (Torres et al., 2011, Caissie et al., 2002). Cette méthode graphique a été choisie pour sa simplicité d'utilisation. Une illustration de

cette construction graphique est présentée à la Figure 44 (données du 06/07/2014 au 08/07/2014).

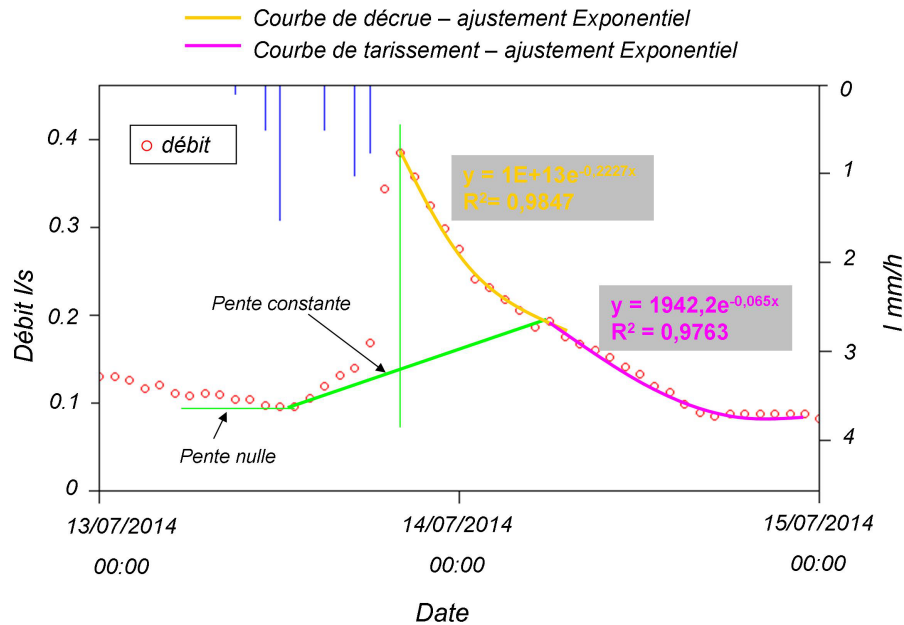


Figure 44 : Représentation de la séparation d'un hydrogramme – données du 06/07/2014 au 08/07/2014

NB: méthode de séparation l'hydrogramme avec la pente constante  
(Torres et al., 2011, Caissie et al., 2002)

Tableau 30 : Caractérisation des courbes de décrue des six épisodes de pluie présentés Figure 6 (h<sup>-1</sup>)

Nombre d'épisode	Date	Coefficient	
		décrue	tarissement
1	04/07 - 06/07/2014	-0.0802	-0.0305
2	06/07 - 08/07/2014	-0.2227	-0.0651
3	08/07 - 09/07/2014	-0.1198	-0.0438
4	09/07 - 11/07/2014	-0.2120	-0.0865
5	11/07 - 13/07/2014	-0.2425	-0.0947
6	13/07 - 15/07/2014	-0.0673	-0.0268

Cette approche est basée sur l'identification visuelle de la fin de la courbe de décrue de l'hydrogramme rapide déterminée par son point d'inflexion. La diminution du débit sur la Figure 44 montre qu'une courbe de tarissement lent fait suite à une

courbe de décrue rapide. L'ajustement exponentiel sur ces deux courbes permet de déterminer deux coefficients : - 0,2227 h<sup>-1</sup> pour la courbe de décrue et - 0,065 h<sup>-1</sup> pour le coefficient de tarissement.

Le début de la montée de l'hydrogramme rapide est déterminé, lui, par l'instant où le début mesuré cesse de baisser. L'hydrogramme lent est représenté par la droite reliant les points de début et de fin de l'hydrogramme rapide, puis par la seconde partie de décroissance du débit.

Cette structuration du débit en deux hydrogrammes est confirmée pour les cinq épisodes de pluie - débit présentés à la Figure 43. L'ensemble des coefficients de décrue et de tarissement estimés sont listés dans le Tableau 30.

Les variations lentes du débit sur des durées de 2-3 jours, observées dans le CD\_tronçon2 présentent la même dynamique que celles des niveaux d'eau observées dans les piézomètres P1 et P2. Ces deux piézomètres sont situés sur la plateforme de voie de service, les variations de niveau observées ne sont pas dues à celles de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen mais plutôt à un phénomène d'infiltration au niveau de cette plate forme. Compte tenu du niveau des entrées d'eau du CD\_tronçon2 (100,56 m NGF à la position P1), cette eau d'infiltration dans la plate-forme de voie de service alimente le CD\_tronçon2 en continu en hiver.

Sur les 298 épisodes de pluie, sur la base de la durée de ces épisodes, les trois types de comportements sont observés :

1) Lorsque la hauteur de précipitation cumulée ne dépasse pas 1mm sur plusieurs heures, elles n'amènent pas la production d'un hydrogramme.

2) Lorsque la durée des pluies dépasse quelques heures et que la hauteur précipitée dépasse 2 mm, un hydrogramme complet se forme avec phase de montée, de décrue et de tarissement (Figure 44).

3) Lorsque la durée des pluies dépasse une demi journée et que la hauteur précipitée dépasse 10 mm, des hydrogrammes comportant plusieurs phases de montée et de décrue en succession sont observés (cas n° 4 et 5, Figure 43).

En considérant une valeur usuelle de la perte initiale par épisode comprise entre 1 et 2 mm pour un terrain sans couverture végétale, tous les épisodes de type 1 correspondent à ceux pour lesquels la hauteur précipitée est entièrement intégrée dans les pertes initiales.

Sur ces 298 épisodes, 143 ont une hauteur précipitée inférieure à 1mm et ne donnent donc pas lieu à la production d'un hydrogramme. 54 donnent lieu à la

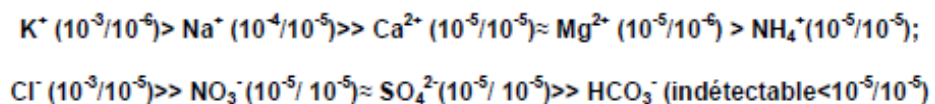
production d'un hydrogramme isolé de type 1 et 101 donnent lieu à la production d'un hydrogramme multiple de type 2.

Ainsi, si l'on considère que seuls les épisodes isolés permettent une analyse détaillée de l'ensemble des processus qui se déroulent dans le système sol – caniveau drainant, Il reste donc 54 épisodes sur 298 exploitables. Parmi ces 54 épisodes, 2 dépassent 10 mm de cumul, 3 sont entre 5 et 10mm, 21 entre 2 et 5mm, et 28 entre 1 et 2 mm.

#### 6.1.2.6 Chimie de l'eau de pluie

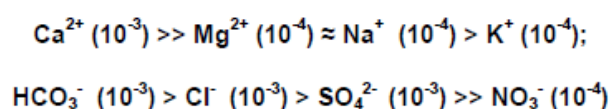
Les paramètres conventionnels (Bertrand, 2009) de caractérisation des signatures physico-chimiques de la pluie : le pH, la température (T°C), la conductivité ( $\sigma$ ) et les ions majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) sont mesurés. Sur trois analyses réalisées au cours de l'année 2016, le pH mesuré de la pluie collectée sur le site de Chauconin dans les tubes fixés sous l'entonnoir du pluviomètre (50 ml Polypropylène ; réf : 352098 sur [www.corning.com/lifesciences](http://www.corning.com/lifesciences)) est entre 7.8 et 8.5 ; la conductivité varie entre 50 à  $200\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Cette valeur élevée du pH pour de l'eau de pluie est due au fait que l'analyse est réalisée sur de l'eau ayant pu séjourner plusieurs semaines dans le tube après la précipitation. La valeur élevée de la conductivité s'explique aussi par la proximité de la voie ferrée et des passages des trains à grande vitesse qui provoquent la remise en suspension et le dépôt de particules fines dans l'entonnoir du pluviomètre, partiellement dissoutes dans l'eau de pluie.

Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissante. Les valeurs mesurées sont indiquées (en mol/L) à l'intérieur des parenthèses et comparées à des valeurs moyennes de 217 échantillons d'eau de pluie en France (Bertrand, 2009). L'analyse détaillée est présentée dans l'annexe 4. En dehors du potassium, du sodium et des chlorures qui sont largement majoritaires ( $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  mol/L), les autres ions sont à des concentrations inférieures à  $10^{-5}$  mol/L en cohérence avec les grandeurs données dans la littérature (Bertrand, 2009).



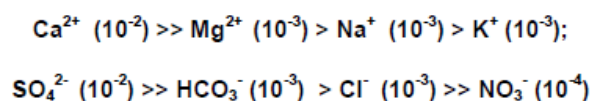
#### 6.1.2.7 Chimie de l'eau de la nappe du Calcaire de Saint-Ouen : prélèvement en P5

Sur 6 analyses réalisées entre 2013 et 2016, le pH de l'eau de la nappe CSO en P5 varie entre 7 et 7,5 ( $\pm 0,2$  de l'incertitude maximale obtenue sur la moyenne de valeur affichée de deux mesures d'écart entre 2 à 3 minutes sur le terrain) ; la conductivité se situe entre 1020 et 1080  $\pm 25$   $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La température varie entre 10 et 13  $\pm 0,5$  °C entre l'hiver et l'été. Son faciès hydrochimique est hydrogénocarbonaté calcique. Le même faciès est observé dans l'eau du fossé béton préfabriqué à barbicanes et du CD \_tronçon1 qui draine le déblai D503 (tronçon 1) dans lequel se situe le piézomètre P5. Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant ( $10^{-3}$  M à  $10^{-4}$  M) et le détail des analyses est présenté dans les tableaux de l'annexe 4.



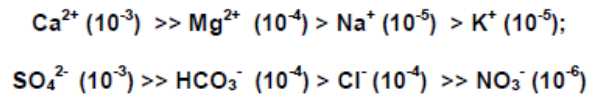
#### 6.1.2.8 Chimie de l'eau interne à la plateforme ferroviaire (piste)

Sur 4 analyses réalisées entre 2013 et 2016 de l'eau échantillonnée dans les piézomètres en P1 et P2 qui sont posés en piste, assimilable à la plateforme ferroviaire de la voie de service, par sa nature et sa constitution, le pH de l'eau récoltée dans les piézomètres varie entre 7 et 7,5  $\pm 0,2$  et la conductivité entre 2070 à 3370  $\pm 25$   $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La température varie entre 8 et 10  $\pm 0,5$  °C au cours de l'année. Il s'agit d'une eau de faciès sulfaté calcique dont les caractéristiques chimiques sont stables dans l'année (pas d'apport particulier). Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant, et le détail des analyses est présenté dans les tableaux de l'annexe 4:



Lors d'une campagne réalisée suite à un épisode pluvieux d'un cumul de 2 mm entre 03h et 06h du 22/09/2015, nous avons réalisé des mesures dans des flaques d'eau stagnante à la surface de la plateforme de la voie de service située à la surface de la piste, 4 heures après la pluie. Les analyses ont montré un faciès sulfaté calcique similaire à celui des eaux prélevées dans les piézomètres P1 et P2 installés dans la structure d'assise. Le pH varie de 7,6 à 9,2  $\pm 0,2$  ; la température est de 17,5  $\pm 0,5$  °C et la conductivité est de 600  $\pm 25$   $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs sont listés par

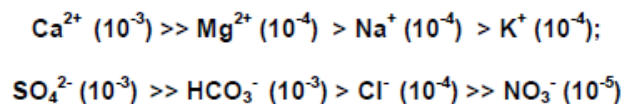
ordre de concentration décroissant, et le détail des analyses est présenté dans les tableaux de l'annexe 4 :



### 6.1.2.9 Chimie de l'eau dans le CD\_tronçon2

#### 6.1.2.9.1 Campagnes d'analyse ponctuelle

Les analyses réalisées lors des 5 campagnes (t1 à t5, 12/12/2013, 02/06/2014, 19/11/2014, 17/03/2015 et 08/07/2015) d'analyse de l'eau du CD\_tronçon2 dans le déblai D505 montre que l'eau drainée par le CD présente un faciès sulfaté calcique tout au long du dispositif du regard S1 à l'exutoire S10, quel que soit la période de l'année. Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant, et le détail des analyses est présenté dans les tableaux de l'annexe 4.



Sur les 50 échantillons d'eau au total, 3 paramètres sont mesurés sur place (pH, T°C,  $\sigma$ ), l'Alcalinité (Alc) et la Dureté (TH) sont analysés au laboratoire. Le pH de l'eau varie entre 8 et 11 en fonction du temps et des points de prélèvement. La température (T°C) varie entre 8 et 20°C entre l'hiver et l'été, stable thermiquement au long du CD, et montre naturellement une tendance saisonnière. La conductivité ( $\sigma$ ) varie entre 900 et 1300  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les valeurs mesurées sont confirmées à 5% près par l'estimation de la conductivité C25 (à 25 °C) à partir de l'analyse des ions majeurs. La dureté dépasse les 48°f (1°f = 10 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), soit 1,6 fois plus que la valeur publiée (20 à 35°f) par l'Agence Régionale de Santé de l'Île de France en 2014.

#### 6.1.2.9.2 Suivi en continu

##### a) Paramètres décrits individuellement

Sur près de deux années d'acquisition (voir la synthèse des mesures Tableau 26), la température de l'eau varie entre 6 et 20°C (Figure 45). La  $\text{pCO}_2$  dans l'air du regard S9 du CD varie de 350 à 650 ppm (Figure 46) et la  $\text{pCO}_{2\_dissout}$  dans l'eau du CD varie de 0 à 600 ppm (Figure 46). Les médianes de la  $\text{pCO}_{2\_dissout}$  et celle dans l'air sont 200 et 400 ppm respectivement (Figure 46a). Le pH de l'eau du CD



instrumenté varie de  $8$  à  $11 \pm 0,2$  ( Figure 47); et la conductivité varie de  $250$  à  $1600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (Figure 47).

#### b) Suivi en continu-système du $\text{CO}_2$

La Figure 46a présente la gamme de variation de la  $\text{pCO}_2$  dans l'eau et dans l'air du CD. D'après la superposition de la pression de  $\text{CO}_2$  dissout dans l'eau du CD instrumenté et celle dans l'air du regard (S9) de  $\text{CD}_{\text{tronçon2}}$  (Figure 46b), on observe que : le  $\text{CO}_2$  dissout est supérieur de  $250$  ppm en été à la valeur en automne et hiver. Il augmente sensiblement de mai à juillet et puis diminue de juillet à septembre et reste bas pendant la période de remontée de nappe : d'octobre à mars. La  $\text{pCO}_2$  dans l'air atteint sa valeur maximale en été (en juillet) et reste en valeur basse d'octobre à mars.

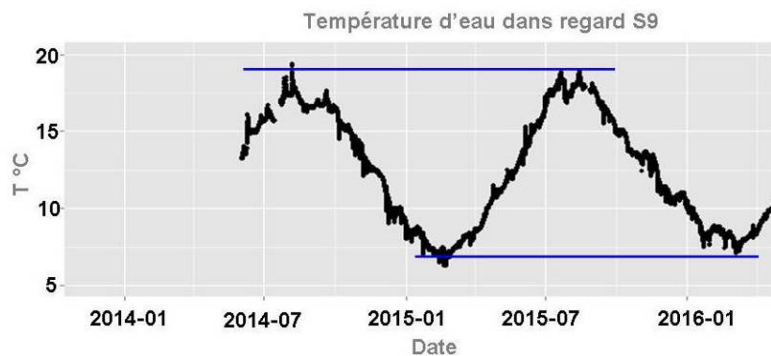


Figure 45: L'acquisition de la température de l'eau du CD – regard S9 -Chauconin

L'acquisition du  $\text{CO}_2$  dissout dans l'eau est réalisée pour la première fois dans une eau de surface. Le capteur utilisé n'est pas encore commercialisé. Le protocole de calibration et le programme d'acquisition ont été développés parallèlement à son utilisation. Après un premier test de mi-juillet à mi-novembre en 2014, un changement de gamme a été nécessaire (passage à une gamme plus faible). En effet la gamme initiale ne permettait pas de suivre les dynamiques à des échelles de temps de l'ordre de la semaine. Le changement de la gamme a été réalisé en usine et l'acquisition a recommencé en mars 2015.

Les données collectées restent très bruitées et ne permettent d'aboutir à une conclusion robuste sur la dynamique à court terme, mais l'évolution saisonnière est largement fiable. La médiane de la  $\text{pCO}_2$  dans l'air est de  $400$ ppm, celle du  $\text{CO}_2$  dissout dans l'eau est de  $200$ ppm. La différence indique que le système est loin de

l'équilibre. A une échelle saisonnière l'écart à la médiane est de 150 ppm en été et de 200 ppm en hiver. Le système du CD est un système fermé vis-à-vis de la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique à court terme (1 à 2 jours, Figure 47). Les pics de la  $p\text{CO}_2$  dans l'air du CD (Figure 46b) sont mis en évidence dans la Figure 47.

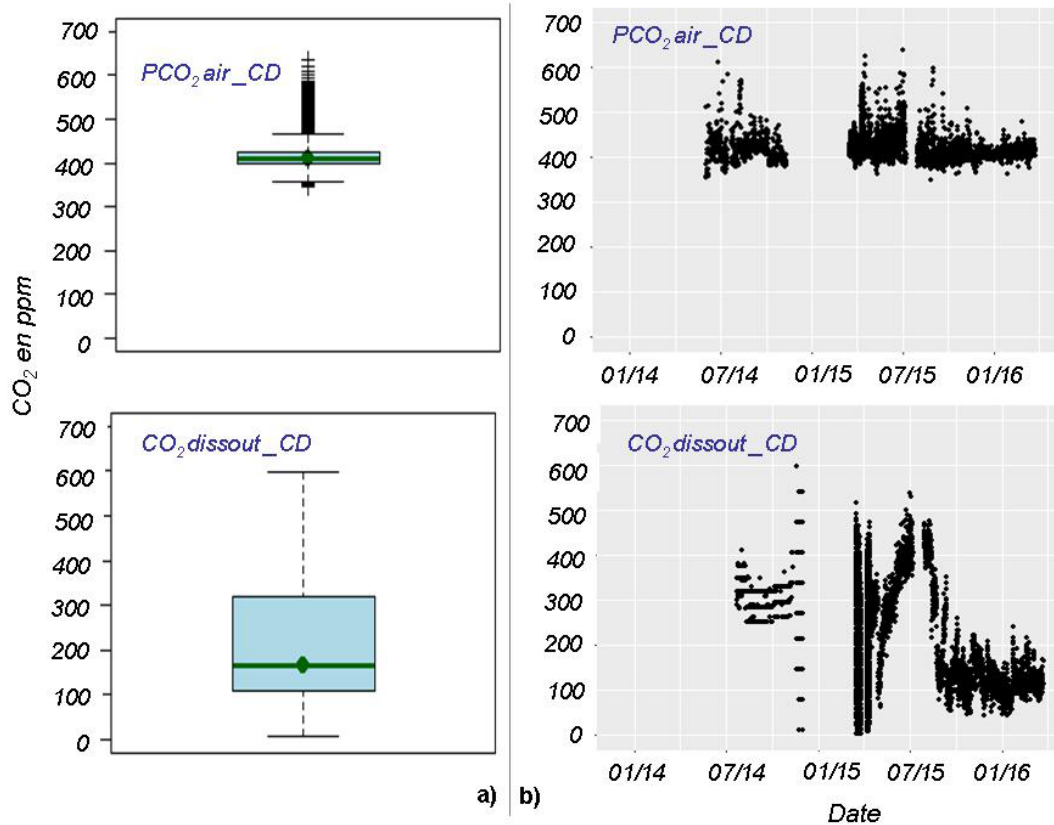


Figure 46 : Synthèse et comparaison de la pression de  $\text{CO}_2$  interne et externe de l'eau du CD

NB : a) boîtes à moustache; b) évolution en fonction du temps, il y a une réduction de gamme 1/10 après 01/2015 pour la  $\text{CO}_2$  dissout

La barre au-delà de 1ère et 3ème quantile sur la boîte de moustache de la  $p\text{CO}_2$  dissout correspond à la valeur minimale et maximale captées in situ pendant cette mesure. La barre au-delà de 1ère et 3ème quantile sur la boîte de moustache de la  $p\text{CO}_2$  dans l'air du CD correspond à la valeur minimale et maximale à l'exception des mesures extrêmes (5% de valeurs à l'extrêmes).

### c) Suivi en continu- l'évolution à court terme

Après avoir superposé les données d'acquisition de pluie, débit, pH, conductivité à 25 °C (C25) et  $p\text{CO}_2$  dans l'air du CD du 09/06 au 14/07 en 2014 (Figure 47), on observe que pendant le temps sec, la conductivité reste élevée et supérieure à 1000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Dans la même période, le pH décroît progressivement jusqu'à atteindre 8 (période du 11/06 au 29/06/2014, Figure 47).

Au moment des épisodes pluvieux, le pH chute à 8 en quelques heures, puis récupère sa valeur initiale dans la journée. Pendant cette même période, la conductivité chute de 400 à 800  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , puis récupère sa valeur initiale en 1 à 2 jours. Cette remontée de la conductivité illustre une arrivée d'eau pendant cette période qui est beaucoup plus chargée que l'eau écoulee dans la période de chute. Cette évolution chimique nous confirme aussi l'écoulement de deux types d'eaux différents dans le CD<sub>tronçon2</sub>.

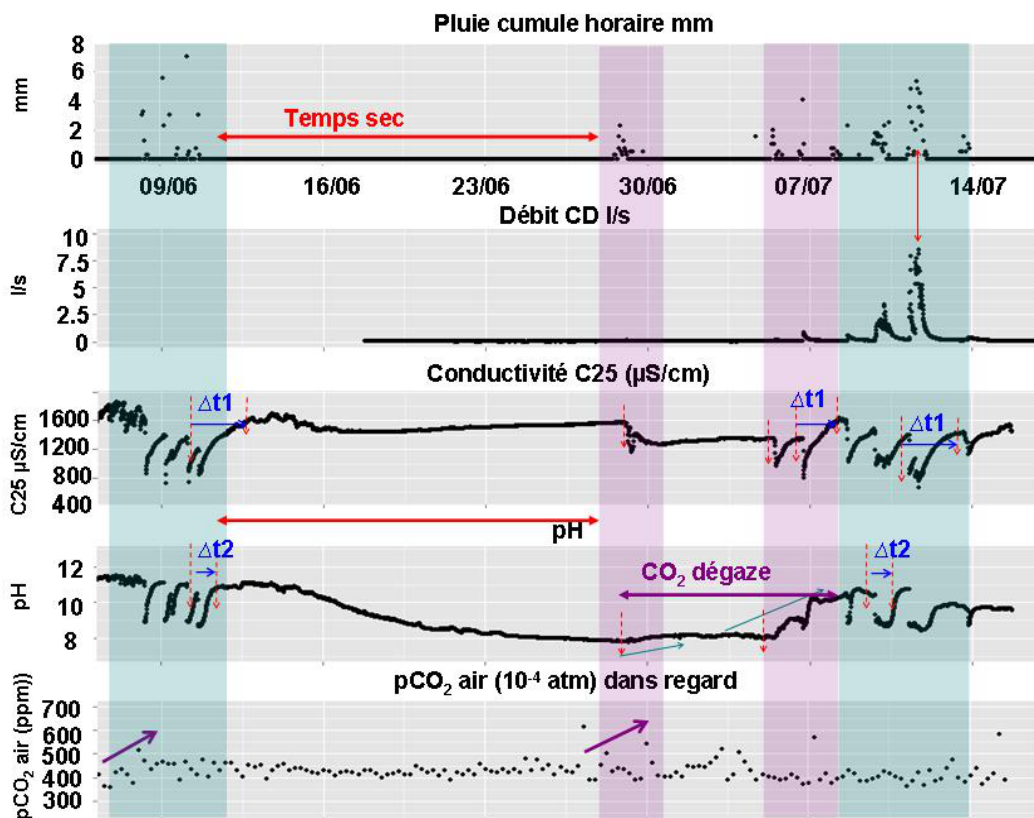


Figure 47: Extrait des données d'une série de paramètres physico-chimiques – 2014

NB :  $\Delta t1$  et  $\Delta t2$  – temps de récupération à la valeur élevée

#### d) Caractérisation des dépôts

Les dépôts du CD<sub>tronçon2</sub> ont été échantillonnés à 4 reprises (12/12/2013, le 02/06/2014, le 19/11/2014 et le 17/03/2015) dans les 9 regards et à l'exutoire (station d'échantillons de S1 à S10, Figure 37) et analysés pour vérifier la constitution des phases minérales et leur évolution. Visuellement, la texture macroscopique du dépôt au fond et au niveau des fentes est sous la forme d'une poudre poreuse et fine, de couleur grise claire, et friable (Figure 48).

D'après des analyses de diffraction par Rayon-X (Figure 48), la seule phase minérale détectée dans l'ensemble des échantillons des dépôts est la calcite cristallisée. Ce résultat est cohérent avec ce qui a été détecté dans les dépôts échantillonnés dans le même CD sur le site de Chauconin en 2011 et 2012 (Jia, 2012; Maraghni, 2011). D'après la titration acide (calcimétrie), les dépôts sont constitués à plus de 90% en masse de carbonates.

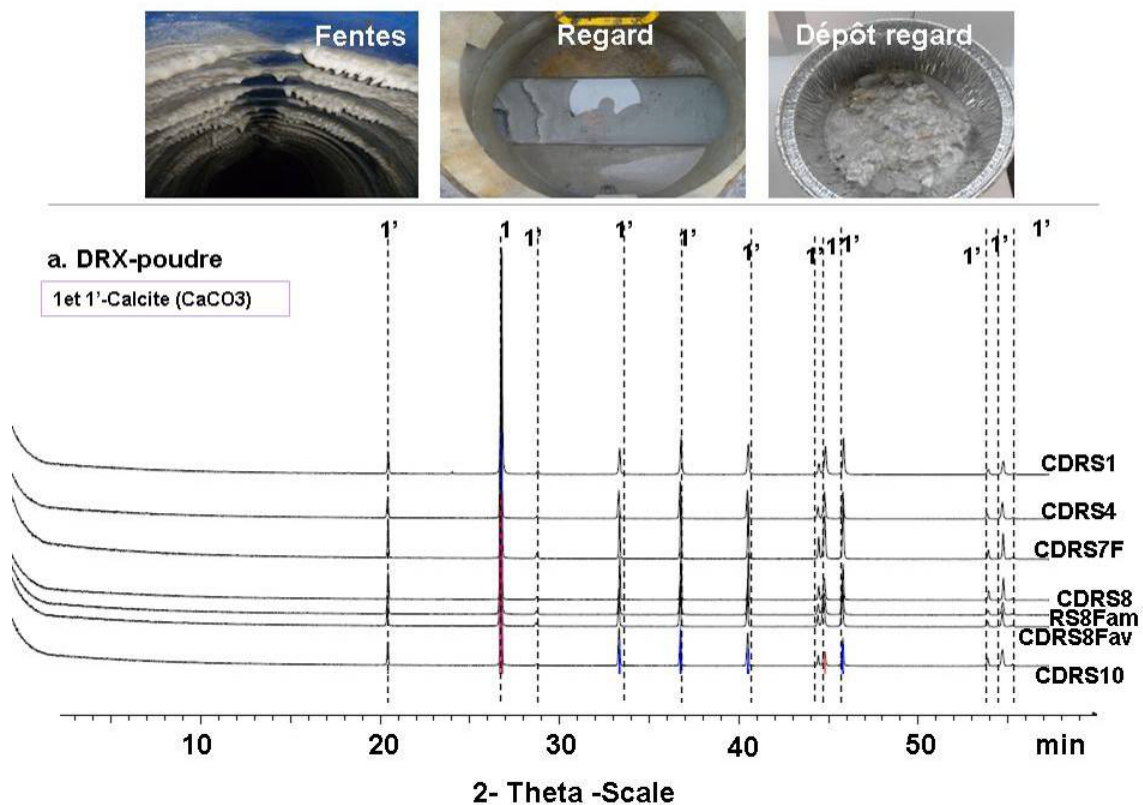


Figure 48: DRX des dépôts dans le CD instrumenté (CD\_tronçon2) –Chauconin (déc. 2013, juin 2014)

NB : CDR S1/S8/S10 –dépôt dans regard S1, S8 et S10 du CD ; CDRS7F – dépôts repris au niveau des fentes dans le regard S7 ; CDRS8Fam/av- dépôt aux niveaux des fentes à l'amont du et à l'aval du regard S8

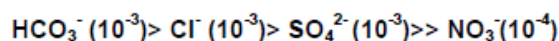
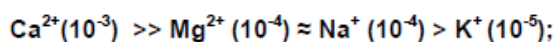
La quantité totale de calcite précipitée dans le CD peut être estimée par les calculs thermodynamique, mais la vitesse de la croissance de la calcite sur une surface d'un substrat solide doit être mesurée in situ. Après 12 mois (02/2015 ~ 01/2016) de suivi sur site par la pose de 22 éprouvettes de dimension d'épaisseur\* largeur \* longueur : 0,1 \* 2,6 \* 7,6 cm (2 éprouvettes/mois) de verre dans l'eau du CD\_tronçon2 sur le site de Chauconin, la vitesse de croissance varie de  $8 \cdot 10^{-10}$  à  $5 \cdot 10^{-8}$  mmol  $[\text{CaCO}_3] \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  selon les mois. Les mesures sont présentées dans l'annexe 5.

### 6.1.2.10 Chimie de l'eau dans le fossé terre revêtu (déblai D503)

#### 6.1.2.10.1 Campagnes d'analyse d'eau ponctuelle

Une unique campagne d'échantillonnage d'eau le 12/12/2013 dans le fossé terre revêtu en béton (FTR) côté voie1 (sens de Paris vers Strasbourg) quelques mètres avant le PK 18+720 (point kilométrique) a été réalisée. Le pH de l'eau est de 7,75 ±0,2 ; la conductivité de 910 ±25 µS.cm<sup>-1</sup> et la température de 4,51 ±0,5 °C. L'eau a un faciès bicarbonaté calcique, même faciès géochimique que l'eau retrouvée dans le piézomètre P5 dans la zone.

Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant (10<sup>-3</sup> à 10<sup>-5</sup> M), et le détail des analyses est présenté dans l'annexe 4 :



#### 6.1.2.10.2 Dépôts

Un dépôt jaune a été prélevé dans le FTR à côté de la voie 1 quelques mètres avant l'ouvrage hydraulique transversal (OHT) (PK 18+720). Le dépôt est dur, il a été récupéré avec un marteau piqueur.

Le dépôt est séché au laboratoire et broyé, puis est analysé par DRX. Comme pour celui du CD<sub>tronçon2</sub>, la calcite est la seule phase minérale qui est détectée (Figure 49). D'après l'analyse calcimétrique qui détecte le pourcentage des composants carbonatés dans un matériau, cette phase unique (calcite) représente plus de 90% sur la masse totale.

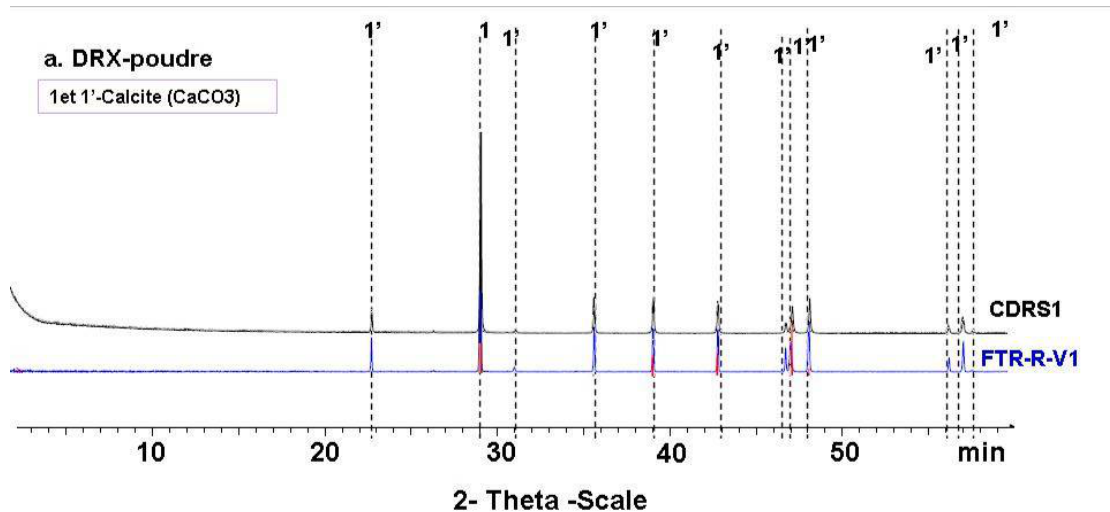


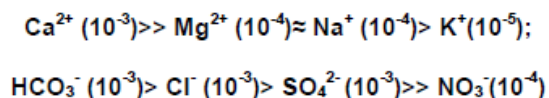
Figure 49 : dépôts échantionnés dans le FTR –Chauconin

NB : CDRS1 : dépôt échantionné dans le regard S1 du CD\_tronçon2 ; FTR- R- V1 : dépôt échantionné au niveau de fossé terre revêtu côté de voie 1

#### 6.1.2.11 Chimie de l'eau du CD installé dans le Déblai D503 (CD\_tronçon1)

##### 6.1.2.11.1 Campagnes d'analyse d'eau ponctuelle

D'après une simple campagne d'échantillonnage d'eau le 08/07/2015 dans le CD\_tronçon1 côté voie 2 au PK 18+720, le pH de l'eau est 8,22 ( $\pm 0,2$ ); la conductivité est 578 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La température est 17,7 ( $\pm 0,5$ ) °C. L'eau a un faciès bicarbonaté calcique. Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant ( $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  M), et le détail des analyses est rapporté dans l'annexe 4:



##### 6.1.2.11.2 Dépôts

En raison d'une faible accessibilité, il n'a pas été possible de récupérer du dépôt dans le CD\_tronçon1. Ce CD se raccorde sur l'OHT par une chute d'eau d'un mètre (Figure 54). Au niveau de cette chute on observe la précipitation d'un dépôt jaunâtre, visuellement brillant, cristallisé et dur.



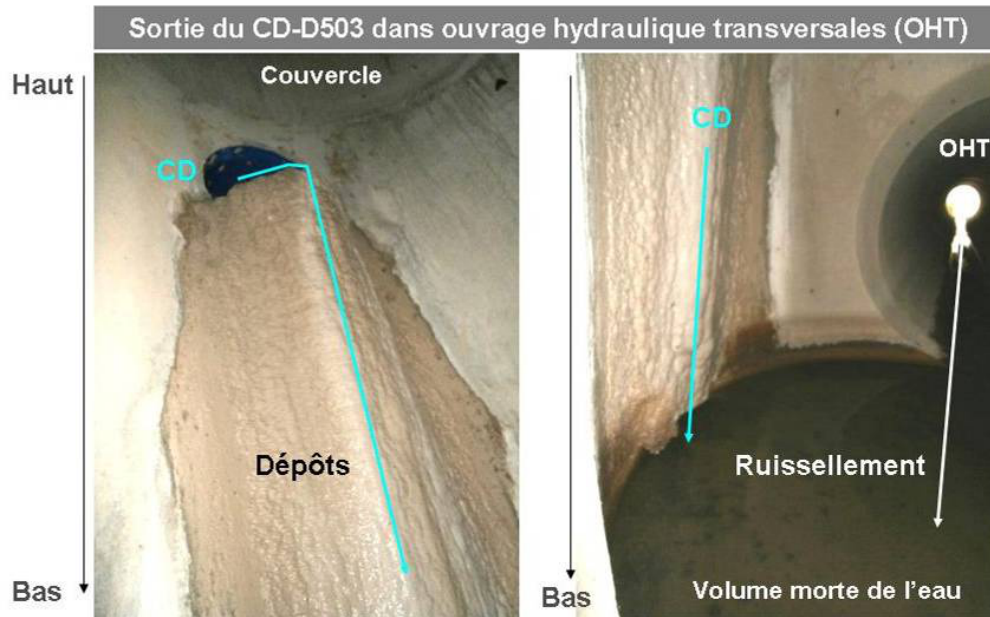



Figure 50: dépôts échantonnés dans le CD<sub>tronçon1</sub> situé dans Déblais D503 -Chauconin

#### 6.1.2.12 Chimie de l'eau dans le Fossé type FBPB équipé dans Déblai D503

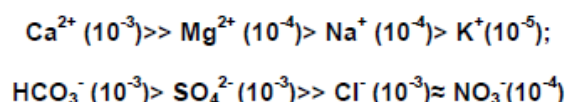
Un fossé béton préfabriqué à barbacanes (FBPB) est posé sur le pied du déblai D503 côté de la voie 2 dans le but de collecter l'eau de la plateforme et l'eau du déblai. Le talus du déblai est renforcé par un masque drainant en pierre (caractéristiques présentées dans le avec photo d'une pierre) de calcite pure. L'eau et le dépôt au fond du FBPB ont été échantillonnés et analysés.

Tableau 31 : Caractéristiques des matériaux rapportés du déblai D503 -Chauconin

Partie sondée		Matériaux	Photos	Observations
Déblai D503	Trench infiltrant du FBPB	Masque drainant (MsD-FBPB)		cailloux à l'échelle d'environ 5 cm ; rose claire
		Masque drainant (MsD-FBPB)	Calcite	CaCO <sub>3</sub>
		MsD - FBPB	> 88 %	~ 8,6 ; 75 ~ 160

### 6.1.2.12.1 Campagnes d'analyse d'eau ponctuelle

D'après deux campagnes d'échantillonnage d'eau dans le FBPB côté voie 2 dans le déblai D503 : le 12/12/2013 au PK 18+180 et le 17/03/2015 au PK 18+468, le pH de l'eau est de 7,9 ( $\pm 0,2$ ); la conductivité varie entre 810 et 910 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La température varie entre 4,5 et 8  $\pm 0,5$  °C. L'eau est de faciès hydrochimique bicarbonaté calcique, le même que celui de l'eau du piézomètre P5. Les ions majeurs sont listés par ordre de concentration décroissant ( $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  M), et le détail des analyses est présenté dans l'annexe 4 :



### 6.1.2.12.2 Dépôts

Le dépôt au fond du FBPB au PK 18+180, côté voie 2, a été échantillonné une fois le 12/12/2013. Il est visuellement constitué par une boue grise (Figure 55).

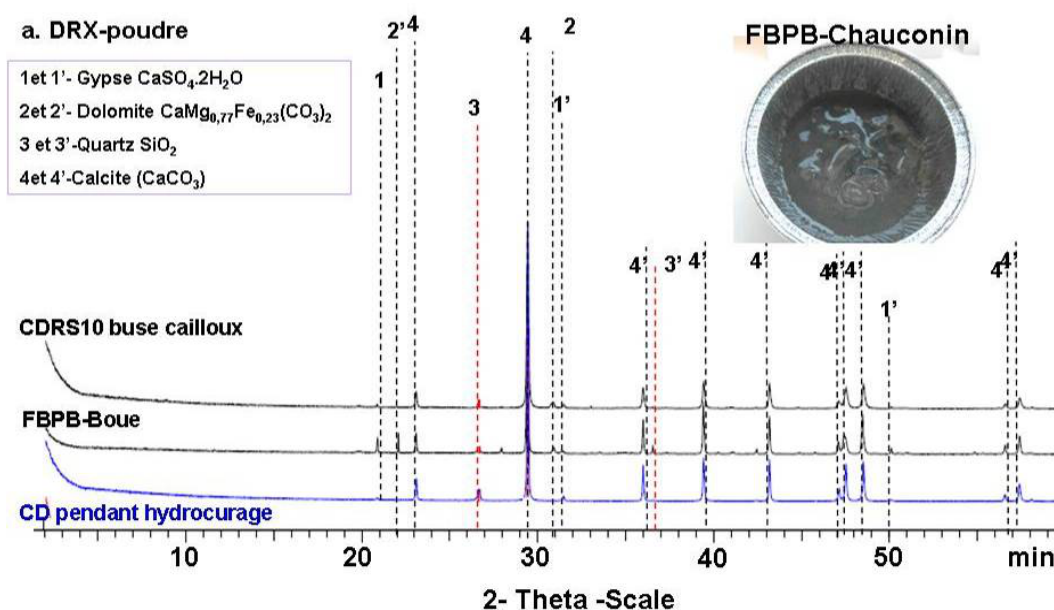


Figure 51: dépôts échantillonnés dans le FBPB -Chauconin

NB : CDRS10 Buse cailloux : dépôt formé autour d'un caillou retrouvé dans le CD\_tronçon2 à l'exutoire (S10) en sortant d'une buse en béton dans déblai D505 ; FBPB – boue : boue échantillonnée dans le FBPB dans le déblai 503 ; CD pendant hydrocurage : dépôt retrouvé à l'exutoire du CD\_tronçon2 pendant l'hydrocurage



D'après l'analyse par DRX, cette boue se compose de gypse, quartz, calcite et dolomite. La fraction carbonatée est de 70% de la masse totale d'après l'analyse par calcimétrie. Sa composition est semblable à celle des matériaux trouvés dans l'autre dispositif en béton du site, la buse béton à la sortie du CD\_tronçon2 dans le déblai D505.

## 6.2 Analyse des résultats des sites supplémentaires étudiés

Afin d'avoir une vision plus intégrée du phénomène de colmatage dans les drainages ferroviaires, nous avons complété l'étude du site pilote de Chauconin par l'étude de sites additionnels présentant une problématique similaire, de colmatage par carbonatation. Ces colmatages se rencontrent dans divers contextes environnementaux et divers contextes ferroviaires dans lesquels plusieurs types de drainage sont rencontrés.

Les huit sites ferroviaires présentés dans le chapitre 3 (Figure 16) ont été étudiés, deux sites de pleine voie, comme Chauconin : Connerré et Soignolles et six tunnels : Marseille, La Motte, Nantilly, Bréval, Caluire et La Ramade. L'étude des cinq derniers tunnels s'appuie sur le rapport de stage de Rousse (2015) mené dans cadre de la thèse.

Une seule visite de terrain a été effectuée par site comprenant des échantillonnages d'eau et des dépôts dans les dispositifs de drainage. Nous les nommons sites flashs pour cette raison. Les informations générales relatives à l'échantillonnage sont listées dans le tableau suivant (Tableau 32).

Tableau 32 : Synthèse des campagnes et types d'analyses pour les échantillons d'eau et de matériaux des 8 sites flashs tunnels et pleine voie (\*)

Site	Type de drain	Nombre d'échantillons		Date campagne	pH-T°C-C25- Alcalinité- Cations-Anions	DRX - poudre
		eau	dépôt			
Connerré*	CD	3	2	17/09/2013	oui	oui
Soignolles*	CD	2	0	04/04/2012	oui	oui
	FBPB	2	0	04/04/2012	oui	oui
Marseille	Parois/fossé	4/3	2	01/07/2014	oui	oui
Le Motte	Parois/fossé	4/4	2	18/06/2015	oui	oui
Nantilly	Parois/fossé	2/2	6	30/06/2015	oui	oui
Bréval	Parois/fossé	2/5	2	12/06/2015	oui	oui
Caluire	Parois/fossé	7/1	2	26/05/2015	oui	oui
La Ramade	Parois/fossé	6/8	5	01/07/2015	oui	oui

L'ensemble des résultats des analyses d'eau des huit sites flashs, y compris le bilan ionique (BI) sont présentés dans l'annexe 6.

Concernant le bilan ionique, en dehors de l'analyse de Soignolles (erreur sur le bilan de 10%), toutes les autres analyses menées dans le cadre de la thèse donnent des erreurs sur les bilans inférieures à 5%, qui permettent des estimations thermodynamique et cinétique robustes.

### **6.2.1 Présentation des sites**

#### 1) Sites de pleine voie

Il s'agit des sites situés sur les communes de Connerré (72) et de Soignolles-en-Brie (77) (cf.chapitre 3-Figure 16). Le système de drainage sur ces sites est semblable à celui de Chauconin avec des collecteurs drainants.

#### 2) Sites en tunnels

Il s'agit de 6 sites situés en tunnels (Rousse, 2015), dans des contextes géologiques différents. Le colmatage concerne à la fois les caniveaux béton de piédroit et les parois de tunnels.

Les différents sites et les campagnes de terrain et d'analyse sont présentés en détail dans l'annexe 6. Ils incluent donc :

- La description du site : localisation, géologie, hydrologie, hydrogéologie et géotechnique) ;
- Les observations de terrain ;
- Les résultats bruts d'analyse d'eau et des dépôts.

Afin d'enrichir la connaissance du phénomène dans l'ensemble des milieux ferroviaires et de permettre une comparaison avec le site de Chauconin, les sites additionnels ont été analysés selon les critères suivants :

- i) Contexte ferroviaire : type de système de drainage et environnement ferroviaire ;
- ii) Contexte environnemental du site : géologie, hydrogéologie ;
- iii) Chimie de l'eau drainée ;
- iv) Caractéristiques des dépôts.

Nous en présentons ici une analyse comparée.

## 6.2.2 Comparaison des contextes de sites

### 6.2.2.1 Géologie et hydrogéologie

Les informations brutes (nature et géométrie des dispositifs du drainage, la géologie et la présence de nappe, le dépôt et son traitement éventuel) sont synthétisées dans les Tableau 33 et

Tableau 34. Les 9 sites d'étude ont en commun d'être localisés dans des sites calcaires : soit par la nature géologique des sites, soit par celle des matériaux rapportés, soit par les deux.

Les collecteurs drainants sont mis en place dans des terrains calcaires dans les trois cas : Chauconin, Connerré et Soignolles, et dans le cas de Chauconin, du gypse est présent dans les matériaux de plateforme.

Dans la plupart des tunnels étudiés, l'encaissant est calcaire, les parois sont également essentiellement calcaires avec parfois du gypse (moellons du tunnel de La Motte). Ces différents matériaux peuvent être des sources de calcium dissout dans les eaux drainées.

Ensuite, on distingue deux catégories de sites selon l'origine de l'eau évacuée dans le système de drainage :

- Les drainages d'eau de surface : en l'absence de nappe, l'infiltration de la pluie dans la zone non saturée (ZNS) est susceptible de se charger en calcaire puis de précipiter à l'intérieur des dispositifs. C'est le cas de Chauconin et Nantilly, qui peuvent être assimilés à des systèmes karstiques, en zone non saturée (Catégorie I : Karst ZNS).
- Les drainages à des fins de rabattement de nappe ou de captage de nappe dans les tunnels : ils concernent les sept autres sites qui drainent une nappe libre sursaturée en calcaire. Lorsqu'elle arrive au contact de l'air libre la calcite précipite (Catégorie II-rabattement de nappe).

Ces deux catégories sont aussi observées lors de l'étude systématique des relations entre le colmatage des CD et le contexte géologique/hydrogéologique sur la LGV Paris-Tours/Le Mans (LN2), dont voici les principaux résultats :

i) Dans l'ensemble de la LN2, il y a 84 km de CD dont 23 km sont colmatés par la calcite. Sur l'ensemble des 84 km de CD, 9 km servent à rabattre une nappe locale; 35,5 km servent à rabattre une nappe temporaire potentielle, et les 39.5 km restants correspondent à des zones non saturées sans présence de nappe à surface libre. Sur les 23 km colmatés, 9,1 km (40%) sont dans ces zones non saturées. Ces

données illustrent bien les deux types d'environnement où se produisent des colmatages : rabattement de nappe et fonctionnement de type karstique en zone non saturée ;

ii) Dans la plupart des tunnels étudiés, l'encaissant est calcaire, les parois sont également essentiellement calcaires avec parfois du gypse (moellons du tunnel de La Motte). Ces différents matériaux peuvent être des sources de calcium dissout dans les eaux drainées.

Un résultat supplémentaire montre que le traitement à 1 ou 2% à la chaux ne constitue pas une source de calcium essentielle. Sur l'ensemble des 84 km de CD de la ligne LN2, 12,5 km sont sur des sites traités à la chaux, mais seuls 1,9 km sont colmatés. Par ailleurs, ces 1.9km ne constituent qu'une faible fraction des 23 km colmatés.

Tableau 33 : Comparaison des dispositifs de drainage le long de LGV







Déblais	Date	Nature		Fentes (CD)/ pente mm/m ou $\Phi$ barbacanes (FBPB/FTR)/ pente mm/m	Dépôts	Solution SNCF
		Dispositifs	Géologie/ présence Nappe Libre			
Chauconin D505	2003	CD en PEHD	Limons-Calcaire/non	DN400/3		Hydro curage
Connerré	1989	CD en béton	Sable-Calcaire/oui	DN400/ pas d'information		Hydro curage
Soignolles	1994	CD en béton	Calcaire/oui	DN400/ pas d'information		Double drains par FBPB
Chauconin D503	2003	CD en PEHD	Limons-Calcaire/oui	DN400/3		Non
Chauconin D503	2003	FBPB	Limons-Calcaire/oui	$\Phi$ 8cm/ 3	 (boue des fines)	Non
Soignolles	1994	FBPB	Calcaire/oui	$\Phi$ 8cm/ pas d'information		Non
Chauconin D503	2003	FTR	Limons-Calcaire/oui	$\Phi$ 8cm/ 3	non	Non

Tableau 34 : Comparaison des dispositifs de drainage et traitements dans les tunnels

Nom du tunnel	Date	Nature		Fossé/Pente (mm/m)	Traitements/fréquence	
		Parois	Géologie/Nappe		Barbacanes de parois	Fossé
Marseille	1999	Béton projeté	Calcaire/oui	Béton à ciel/0,9 à 2,5	non	Sachet de pastille (PASP) 6kg/ 6mois
Le Motte	1854	Briques	Craie/oui	Béton à ciel /4,7	non	Injection 10% HCl 30l/j
Bréval	1853	Briques	Calcaire/oui	PVC à ciel /0,009	Sachet de pastille PASP	pas d'information
Caluire	1883	Moellons calcaire	Molasse/oui	A ciel /3,5	pas d'information	
La Ramade	1886	Moellons calcaire	Tuffeau/oui	Béton fermé/7,95		
Nantilly	1885	Moellons calcaire	Tuffeau/non	A ciel /3		

NB : PASP : acide polyaspartique ;

### 6.2.2.2 Comparaison des dépôts et de l'eau

Le Tableau 35 rassemble les informations relatives à la nature de l'eau et de dépôts des 9 sites étudiés.







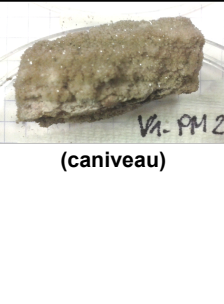


#### a) Synthèse des dépôts

A la base des résultats d'analyses DRX pour l'ensemble des sites (à l'exception de Soignolles pour lequel les dépôts n'ont pas été analysés), on trouve que les dépôts accumulés dans l'ensemble des dispositifs étudiés sont essentiellement de la calcite :



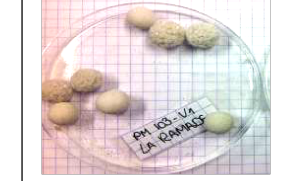

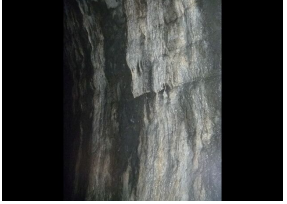




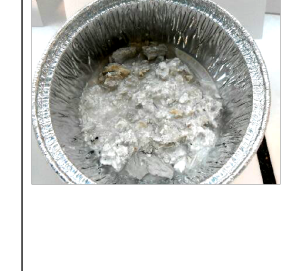





- les dépôts de calcite pure observés dans les dispositifs de drainage sur le site de Chauconin, Connerré, Marseille, La Motte, Caluire et Nantilly sous différentes formes : soit durs, soit mous.
- les dépôts retrouvés sur le site de Bréval et de La Ramade se composent de calcite (plus de 80% en masse) et de quartz et sont durs.

D'après le Tableau 35 que ce soit en paroi, en caniveau, ou en CD, visuellement, les dépôts carbonatés observés sur l'ensemble des sites se présentent sous trois formes distinctes : blocs, billes et boue de calcite. Ces dépôts apparaissent de couleurs différentes : jaunâtre translucide, blanc opaque, gris opaque ou laiteuse.

Tableau 35 : Chimie de l'eau et caractéristiques des dépôts dans les tunnels et CD de pleine voie

Nom du tunnel/ chimie	Dépôts			
	Parois	Fossé (flux →)	Echantillons DRX (parois/fossé)	Phases minérales et texture
<b>Marseille</b> 01/07/2014 pHmoy 7,6 16,8 °C TH 40~ 50 °f TAC ~ 6mM +++++				dépôt cristallisé ; Adhésif et très dur, se compose de calcite pure
<b>La Motte</b> 17/06/2015 pHmoy 7,9 12,3 °C TH ~ 20 °f TAC~5,5mM +++++			 (parois en amont)	Dépôt de calcite pure sur parois ; les matériaux de parois se compose de gypse (54%), de quartz (32%), de muscovite (11%) et de goethite (3%)
<b>Bréval</b> 11/06/2015 pHmoy 8,0 13,2 °C TH ~ 30 °f TAC~4,2mM +++			 (caniveau)	dépôt très dur et bien cristallisé, se compose de 65% de calcite et 35% de quartz
<b>Caluire</b> 26/05/2015 pHmoy 8,1 12,7 °C TH 25~ 40 °f TAC~4,3mM +++				Dépôt dur sur parois et en forme de billes en piedroit ; se composent de calcite pure



<p>La Ramade 01/07/2015 pHmoy 7,9 17,8 °C TH 40~ 55 °f TAC~5,3mM ++++</p>			 	<p>Dépôt sous forme de billes semblable à des pisolithes sphérique ; calcite (80%) et quartz (20%) ;</p> <p>Dépôt dur ; se compose de calcite (90%) et quartz (10%)</p>
<p>Nantilly 30/06/2015 pHmoy 8,0 15,1 °C TH ~ 40 °f TAC ~ 4mM +++</p>			 (caniveau)	<p>Poreux et facile à fracturer à la main ; se compose de calcite pure</p>
<p>Déblais</p>	<p>Fentes</p>	<p>Fond du CD</p>	<p>Echantillons DRX</p>	<p>Phases minérales</p>
<p>Chauconin 02/06/2014 pHmoy 9,1 15 °C TH 50~70 °f TAC 0,5 mM ++</p>				<p>Calcite cristallisée ; Facile à fracturer en poudre à la main</p>
<p>Connerré 17/09/2013 pHmoy 7,7 16 °C TH ~ 30 °f TAC~3,4mM +++</p>				<p>Calcite cristallisée ; sableuse et très dure ; pure calcite</p>
<p>Soignolles 04/04/2012 pHmoy 7,8 12,4 °C TH 35~45 °f TAC ~4 mM +++</p>			<p>Pas de photo Pas d'analyse DRX</p>	<p>Phase minérale : pas d'information ; mais le dépôt est très adhésif et très dur</p>
<p>NB : °f – dureté de l'eau (TH) en degré français (&gt;15 °f, eau dure) ; mM – alcalinité carbonatée (TAC) en millimole par litre (&gt;1 mM, eau sursaturée) ; +++++ quantité de dépôts max ; DRX –diffraction rayon X</p>				

Leur apparence rappelle celle des dépôts rencontrés dans les grottes naturelles (Gunn, 2007). Afin de mieux comprendre les mécanismes de formation et les spécificités des sites ferroviaires et afin de faire des rapprochements, nous nous sommes intéressés aux recherches réalisées dans le milieu naturel.

### a.1) Forme générale des dépôts

Pour l'ensemble des 9 sites étudiés, on trouve que :

- Les dépôts de Chauconin et de Nantilly se présentent sous forme de « Boue », que l'on a qualifiés ici de dépôts mous ; ces dépôts laiteux (Chalmin et al., 2005) sont aussi observés dans les eaux stagnantes des grottes.
- Les dépôts observés dans les 7 autres sites se présentent sous forme de blocs cimentés que l'on a qualifiés de dépôts durs.
- Des billes blanches sont observées dans les tunnels de Caluire et de la Ramade. Les billes ressemblent à des pisolithes sphériques (Chafetz and Butler, 2006) pour lesquelles le minéral croît autour d'un nucléus sableux poli sous l'action de l'eau.

### a.2) Couleur des dépôts

Pour l'ensemble de 9 sites, on trouve que :

- Les dépôts de Marseille et de Caluire sont de couleur opaque blanche ; les dépôts de La Motte, Bréval, La Ramade, Connerré et Soignolles sont de couleur jaunâtre translucide ;
- Les dépôts de Chauconin et Nantilly sont de couleur grise : opaque ou laiteuse.

En général, la calcite opaque blanche ou grise est souvent trouvée dans le milieu naturel. Elle croît sous forme de petits cristaux inférieurs à 10  $\mu\text{m}$  selon une orientation aléatoire (Chalmin et al., 2005). Leur cristallisation est rapide, et apparaît souvent dans de l'eau hyper saturée de calcite avec une dureté élevée. La calcite opaque peut aussi se former dans les sédiments des lacs et elle est différente de celle formée dans les grottes : elle cristallise dans le système rhomboédrique sous forme de cristaux de 10 à 20  $\mu\text{m}$ .

Les calcites jaunâtre opaques peuvent aussi se former dans l'eau qui contient des composés phosphatés (Lin et al, 2002) ou par des actions biotiques (Chalmin et al., 2005).

### b) Les synthèses de caractéristiques chimiques de l'eau

D'après l'ensemble des analyses d'eau sur les 9 sites à l'exception de l'eau de Chauconin (sulfatée calcique), l'eau circulant dans les dispositifs de drainages est de type hydrogénocarbonatée calcique (détails annexe 6).



Dans la littérature, 8 paramètres (Température, pH, concentration de calcium [Ca], alcalinité, carbonate, pCO<sub>2</sub> dissout, force ionique I et indice de saturation SI) servent en général à étudier un système calco-carbonique. Ils ont été retenus pour comparer la chimie de l'eau des différents sites (Figure 52, détails à l'annexe 6).

La température de l'eau drainée dans l'ensemble des dispositifs des 9 sites varie entre 4 et 24 °C selon le contexte de site et la période de la mesure. Afin de distinguer l'origine de l'eau, on peut se rappeler que de manière générale la température d'une eau de nappe est autour de 12°C dans l'année si la profondeur est inférieure à 20m (Bertrand, 2009; Tardy, 1993). En dehors de cette gamme l'eau de surface peut être fortement impactée par la température atmosphérique qui présente une gamme de variation plus large ce qui peut permettre de distinguer l'origine des eaux drainées en l'absence de piézomètres ou de données complémentaires. Le pH de l'eau des 9 sites varie entre 7 et 11. La majorité des eaux naturelles présentent un pH 9, les valeurs supérieures indiquent une source anthropique (Bertrand, 2009; Tardy, 1993). Par exemple à Chauconin, les pH élevés (pH11) mettent en évidence une lixiviation des matériaux rapportés dans le milieu ferroviaire.

La concentration en calcium [Ca] de l'eau des sites est toujours inférieure à 10 mM. Des études (Bertrand, 2009; Tardy, 1993) montrent que lorsque cette valeur est dépassée cela signifie un apport anthropique (Chauconin 16,5 mM dans P1).

L'alcalinité des sites est comprise entre 0,5 et 7 mM. Les eaux de nappes calcaires ont en général une alcalinité supérieure à 2 mM (Bertrand, 2009; Tardy, 1993), ce que l'on observe dans la majorité de nos sites à l'exception de l'eau du collecteur drainant de Chauconin (0.5 à 1mM).

La concentration de carbonates est liée à la pCO<sub>2</sub> dissout ou à l'alcalinité et du pH de l'eau. A partir de ces paramètres on a calculé une gamme entre 10<sup>-3.5</sup> à 10<sup>-6.5</sup> M pour les 9 sites. D'après les calculs de l'indice de saturation de la calcite des 9 sites, on observe qu'une eau proche de l'équilibre vis à vis de la calcite correspond à une gamme de concentration en carbonates entre 10<sup>-4.5</sup> à 10<sup>-5.5</sup>M en fonction des sites. En dessous de 10<sup>-5.5</sup> M, l'eau a une capacité de précipitation de la calcite. Au dessus de 10<sup>-4.5</sup> M, l'eau a une capacité de dissolution du calcium.

La pCO<sub>2</sub> dissout de l'eau drainée sur ces 9 sites est comprise entre 10<sup>-1</sup> et 10<sup>4.25</sup>ppm. Les valeurs supérieures à 1000 ppm correspondent au cas d'une eau de nappe à surface libre (Tardy, 1993), ce qui correspond à l'ensemble des 8 sites à l'exception de Chauconin. Sous cette valeur, il s'agit d'eau d'infiltration de la zone non saturée, dont la valeur est proche de celle de la pCO<sub>2</sub> atmosphérique de 400 ppm (cas de Chauconin) ;

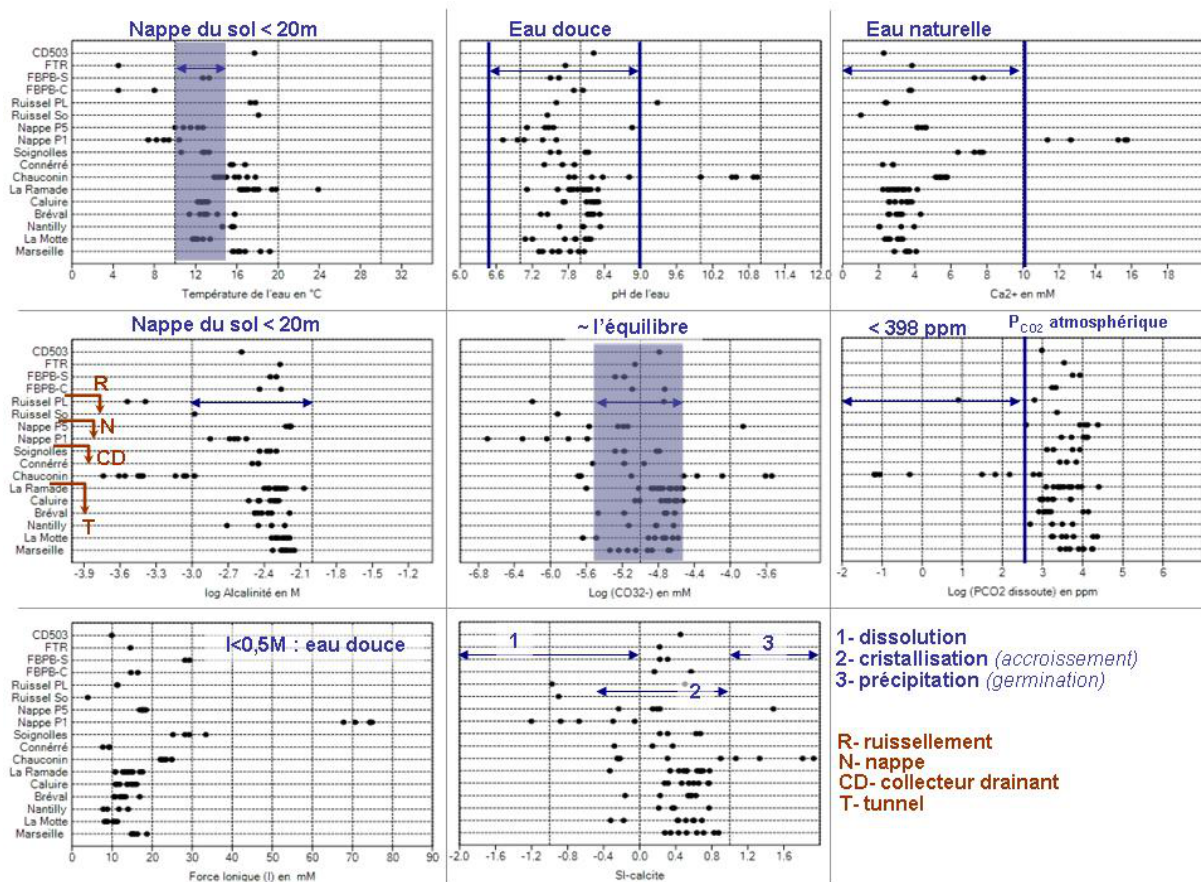


Figure 52: Comparaison de la chimie de l'eau des sites étudiés

La force ionique (I) des eaux présentes sur les 9 sites est comprise entre 0,005 et 0,08 M et donc inférieure à 0,5M (Zuddas and Mucci, 1998b) ce qui correspond à une eau douce non contaminée par des sources de pollutions extérieures (engrais, déchets...).

L'indice de saturation montre 3 cas pour ces 9 sites : SI < 0 qui indique la capacité de dissolution des calciums (eaux d'infiltration de la plateforme de Chauconin) ; SI entre 0 et 1 indique une eau qui favorise la cristallisation, phénomène lent avec potentiel fort d'accroissement que l'on retrouve dans l'ensemble des tunnels, Connéré et Soignolles ; SI supérieur à 1 qui correspond à une eau à potentiel de précipitation sous forme d'une germination rapide, ce qui est le cas dans le CD de Chauconin. Dans le tunnel de Nantilly qui draine la nappe par intermittence en fonction des saisons, les caractéristiques des dépôts (dépôts mous et dépôts durs selon les tronçons) pourrait indiquer l'existence des deux phénomènes.

### 6.3 Epilogue du chapitre

En conclusion, dans ce chapitre, on a synthétisé l'ensemble des résultats de Chauconin (données statique et dynamique) et les sites supplémentaires (données statique : simple campagne d'analyse d'eau et de dépôts).

L'étude comparée des sites complémentaires a permis d'enrichir notre connaissance du phénomène d'entartrage et de sa diversité d'apparition dans différents contextes ferroviaires et environnementaux. Cette étude a permis d'établir une base de données descriptive et quantitative proposant des paramètres et leurs valeurs de seuils. Ainsi cela a permis de proposer une classification des phénomènes selon les catégories suivantes:

a) deux origines d'entartrage : origine anthropique (matériaux rapportés de plateforme), origine naturelle (géologie)

La géologie calcaire et les matériaux rapportés qui contiennent du calcium (calcaire ou gypse) sont deux sources retrouvées sur les milieux ferroviaires qui alimentent l'eau avec le calcium ou carbonate.

b) deux types de systèmes : un système en zone saturée (la nappe drainée) et un système en zone non saturée (l'infiltration évacuée).

D'un point de vue descriptif : on observe que lorsque l'on draine une nappe carbonatée, les dépôts sont plutôt durs (cas de Connerré, Soignolles et des tunnels) et lorsqu'on draine une eau d'infiltration, les dépôts sont généralement mous (cas de Chauconin). Dans les cas où une nappe temporaire liée à l'infiltration de la pluie est drainée, à la fois des dépôts durs et mous sont constatés sur le même site : cas de Nantilly.

D'un point de vue quantitatif : les dépôts durs sont souvent observés dans une eau à débit permanent d'indice de saturation compris entre 0 et 1, un pH entre 7 et 8, et une température stable dans l'année. Les dépôts mous sont constatés dans le cas de débits temporaires, d'indices de saturation supérieur à 1, un pH élevé (>9), une température très variable, soit des sites soumis à des variations de conditions météorologiques.

Sur la base de l'ensemble de ces études, on obtient huit critères ou gammes pour étudier d'autres cas dans le contexte ferroviaire. En considérant les limites d'opérationnalité (difficulté de la mesure) dans les emprises ferroviaires, quatre paramètres mesurés (pH, température, [Ca] remplacé par la dureté, alcalinité), et un paramètre calculé (indice de saturation) suffisent dans les 9 cas d'étude et permettent de classer les types d'eau des sites de manière quantitative.

Cependant, les conclusions restent descriptives. Une approche de modélisation reste nécessaire afin de répondre aux questions de la quantité de dépôts formés (chapitre 7) et les questions sur la dynamique du système (cas de Chauconin) : la formation de la calcite vis-à-vis de l'évolution de l'eau présente dans les dispositifs de drainage sous diverses conditions météorologiques (chapitre 8 et 9).

A partir du chapitre suivant, la discussion de l'ensemble des résultats abordera successivement :

- chapitre 7 : Modèle thermodynamique afin de quantifier la calcite précipitée et recherche de l'origine d'eau sous l'aide de modélisation avec les données statique ;

- chapitre 8 : modèle physique (hydrologique) afin de quantifier les contributions de différents écoulement sur le site de Chauconin avec les données dynamique ;

- chapitre 9 : modèle hydrogéochimique (dynamique et conceptuel) afin de coupler les calculs physiques et les calculs chimiques sur le cas de Chauconin.



## **Chapitre7 Analyse du fonctionnement du CD**

Dans la première partie de ce chapitre, les résultats des analyses des eaux récoltées sur le site de Chauconin lors des campagnes de prélèvements sont analysés. Les paramètres retenus sont le pH, la température (T°C), la conductivité ( $\sigma$ ), les concentrations en sept ions majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) et l'alcalinité (Alc). Les valeurs sont présentées dans l'annexe 4. L'estimation de la balance ionique (BI%) et le degré de saturation de l'eau vis-à-vis la calcite ( $\Omega$ - Calcite) sont aussi présentés dans ces tableaux.

Dans la deuxième partie du chapitre, l'origine de l'eau drainée par le CD est discutée en utilisant une approche de modélisation inverse. La dynamique du système couplé hydrodynamique et hydrogéochimique de l'eau sera présentée dans le chapitre 9.

Pour rappel, cinq piézomètres (P1 à P5) ont été instrumentés sur le site de Chauconin. L'eau est présente toute l'année en P5 (en crête de déblai, à 1.5 km du CD instrumenté) ; il s'agit d'eau de la nappe du calcaire de Saint -Ouen. L'eau n'est retrouvée qu'en hiver dans P1 et P2 (situés au niveau de la plateforme de la voie de service à côté du CD instrumenté); il s'agit d'eau s'étant infiltrée dans la plateforme. L'eau n'est jamais présente dans les piézomètres P3 et P4 (en crête de déblai du CD instrumenté).

Les 10 points de prélèvement d'eau du CD, dans les 9 regards et à l'exutoire sont nommés de « S1 » à « S10 ».

### **7.1 Analyse de l'eau drainée par le CD (Chauconin)**

#### **7.1.1 Faciès et ions principaux de l'eau du CD**

Les eaux qui transitent dans le collecteur drainant ont fait l'objet de prélèvements et analyses répartis en 5 campagnes principales. Ces campagnes ont couvert l'ensemble des saisons au cours des deux années de suivis (12/12/2013, 02/06/2014, 19/11/2014, 17/03/2015 et 08/07/2015). Elles ont toutes été réalisées en période de temps sec. Les résultats de ces campagnes d'analyse sont présentés dans le diagramme de Piper (Figure 53a), chaque point représentant un échantillon. Les différents points d'analyse sont représentés dans le diagramme par la concentration de leurs ions principaux. En se basant sur ces analyses, on observe que la signature chimique de l'eau du CD est sulfatée-calcique quelle que soit la campagne

considérée. Le diagramme met en évidence qu'elle n'évolue pas pendant ces 2 ans de suivi.

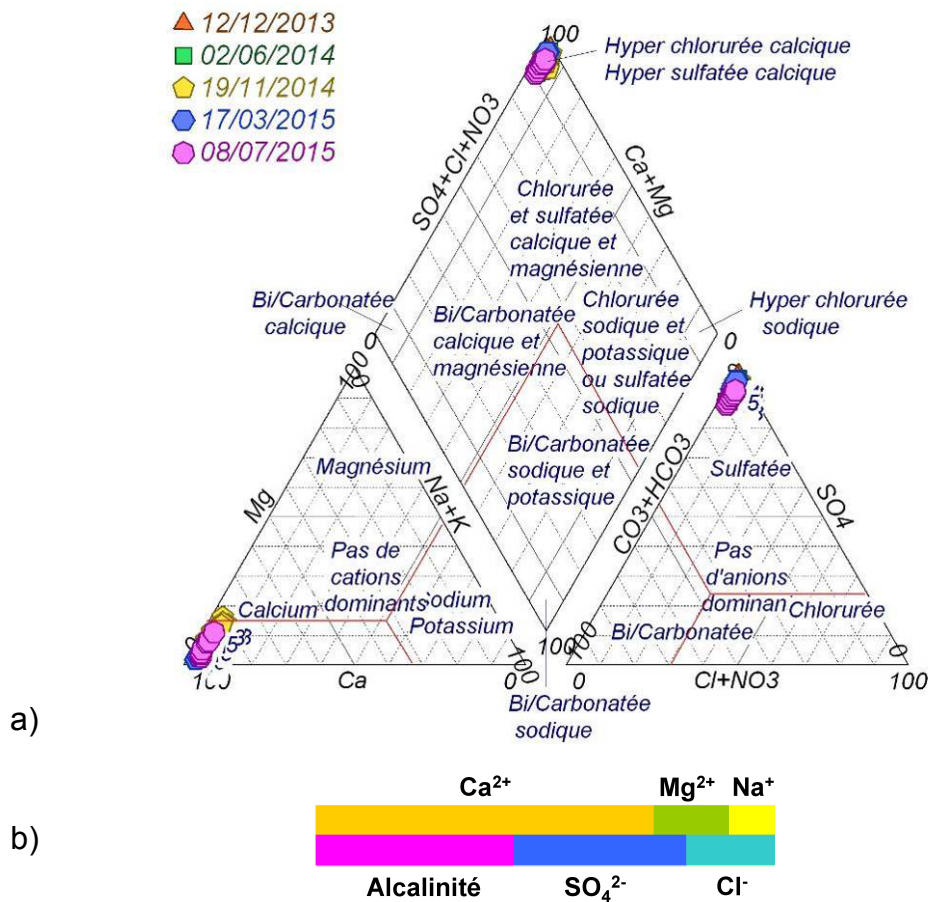


Figure 53 Signature chimique des eaux du collecteur drainant à Chauconin - période 2013 - 2015 (5 campagnes). a) Diagramme de Piper –b) Diagramme de Stabler, proportion des ions majeurs de l'eau du CD (moyenne)

Le diagramme de Stabler (Figure 53b), réalisé avec la moyenne des différentes campagnes permet de déterminer que l'eau du CD est de type sulfatée-calcique. Le calcium et le sulfate représentent plus de 80% de la concentration équivalente (meq/l) des huit ions majeurs (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Alcalinité). La concentration équivalente (meq/l) de ions calcium et sulfate évolue peu entre les campagnes (Ca<sup>2+</sup> (±6%) ; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (±4%)) et le faciès de l'eau ne change pas non plus. Cela semble souligner une source unique et permanente d'eau dans le sol drainé par le CD.

Le diagramme de Piper correspondant à chaque campagne, pour tous les prélèvements disponibles, est présenté dans l'annexe 7. D'après ces figures le faciès de l'eau dans le CD est toujours sulfaté-calcique. Il en est de même pour l'eau des piézomètres P1 et P2 situé dans la plateforme de la voie de service. Par contre, les eaux des autres drains du même site de Chauconin, mais 1.5 km à l'amont du CD

ont des faciès calco-carbonaté, identiques à l'eau trouvée dans le piézomètre P5 montrant la forte variabilité des faciès physico-chimiques en fonction des caractéristiques géologiques et de la réalisation de la ligne à grande vitesse.

### 7.1.2 Etat thermodynamique de l'eau du CD vis-à-vis de la calcite

L'ensemble des campagnes permet de connaître l'état thermodynamique de l'eau selon les saisons. Les résultats des analyses des eaux (annexe 4), sont présentés sous forme de diagrammes « boxplot » (boite à moustaches) qui illustrent la variabilité le long du CD pendant chaque campagne (cinq campagnes nommés t1 à t5, Figure 54) pour six paramètres.

Cinq des six paramètres présentés sont liés à l'équilibre thermodynamique du système carbonate : le pH, la température ( $T^{\circ}\text{C}$ ), la dureté (TH), l'alcalinité (Alc) et le degré de la saturation de la calcite ( $\Omega$ ). La conductivité ( $\sigma$ ) permet de voir l'évolution de l'ensemble des huit ions majeurs (réactifs ou non). L'axe des abscisses indique la gamme d'un paramètre mesuré, et l'axe des ordonnées classe les 5 campagnes. Dans chaque campagne, les 10 mesures sont synthétisées par une boite à moustaches max (min,  $Q1 - 1.5*(Q3-Q1)$ ) et la min (max,  $Q3 + 1.5*(Q3-Q1)$ ), et si les extrêmes ne sont pas atteints, les valeurs extrêmes au delà des moustaches sont représentées individuellement.

La température varie de 8 à 20°C entre l'hiver et l'été, et montre une tendance saisonnière. A l'exception de la campagne t2, les écarts inter quartiles sont tous inférieurs à 1°C. Cette faible variation de la température le long du CD de 800 m montre que le système est thermiquement stable à l'échelle de la durée de l'échantillonnage. La grande variation de température observée pendant la campagne t2 est liée à 4 mesures erronées respectivement dans les regards S1, S2, S5 et S6. En effet, lors de cette campagne, du fait de la faible hauteur d'eau dans les 4 regards la température a été mesurée à l'extérieur du regard dans un échantillon de 50 ml. Au moment de l'échantillonnage, la température de l'air était d'environ 21 °C en plein soleil ce qui a réchauffé l'eau des échantillons. Sur les autres points la température varie de moins d'un degré.

La conductivité varie entre 900 et 1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les 5 campagnes. A l'intérieur d'une même campagne la différence maximale de conductivité en fonction des regards est comprise entre 100 et 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en tenant compte de l'incertitude de la mesure, il n'y a pas lieu de suspecter d'erreur de mesure sur ce paramètre. Ceci est confirmé par un recalcul de la conductivité (C25 à 25 °C) à partir de l'analyse des ions majeurs ; l'écart entre la valeur calculée et celle mesurée in situ reste inférieur à  $\pm 5\%$ .



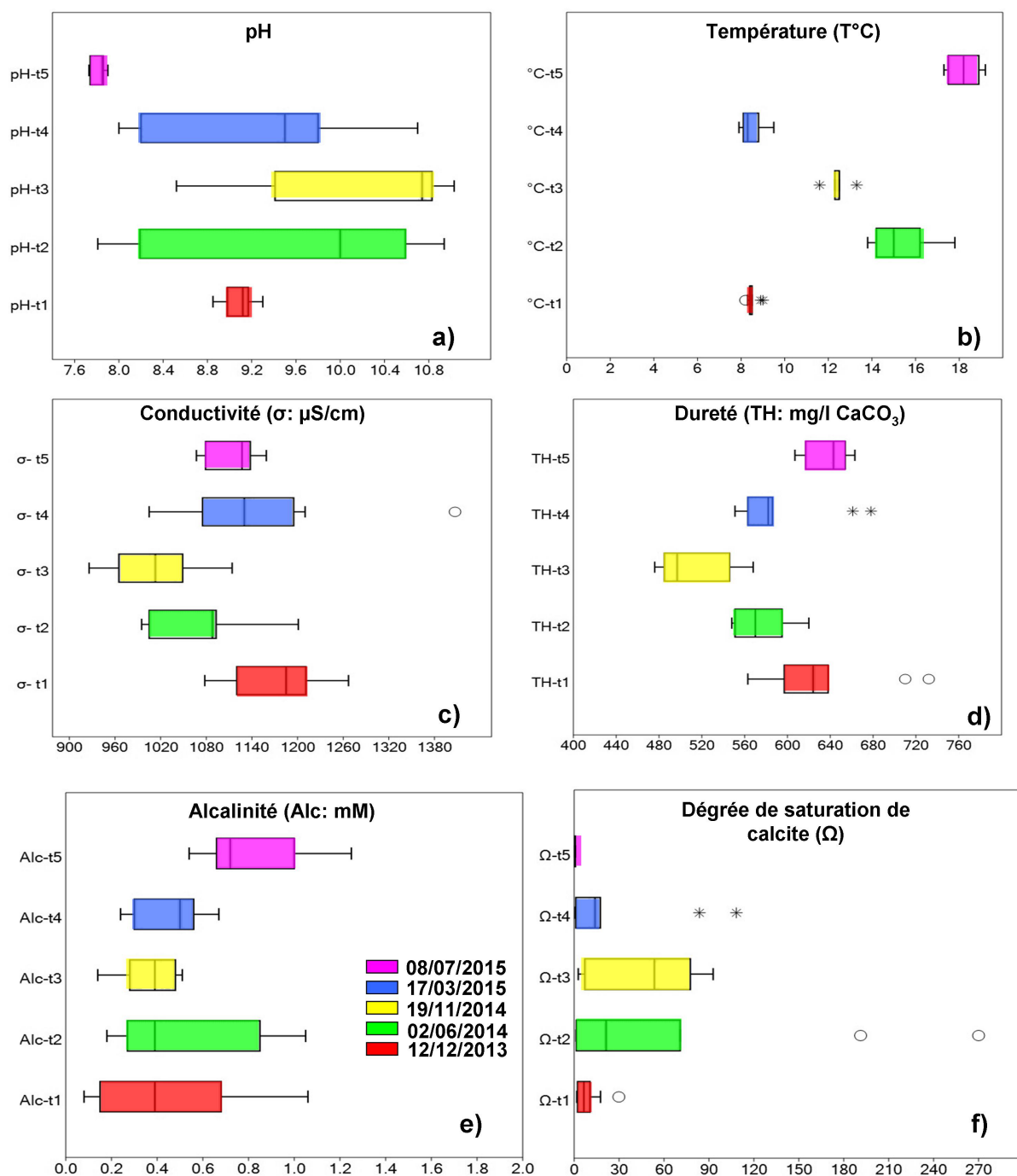


Figure 54 : Caractérisation de l'eau du CD –Chauconin

t1 à t5 : 5 campagnes d'échantillonnage et d'analyse de l'eau du CD (9 regards et exutoire). Les campagnes t1 à t5 ont eu lieu 12/12/2013, 02/06/2014, 19/11/2014, 17/03/2015 et 08/07/2015

Pour l'échantillon prélevé en S1 le 2 juin 2014, conductivité mesurée de 1100  $\mu\text{S/cm}$ , la contribution des ions à la conductivité est représentée Figure 55. Calcium, carbonates et sulfates représentent 95% de la conductivité. Compte tenu de la

contribution de l'ion calcium (38%), la variation de la conductivité de 100 à 200  $\mu\text{S/cm}$  par campagne s'explique par la seule variation de la dureté observée de 40 à 80 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (voir aussi la Figure 56 qui représente la mesure de la dureté de l'eau le long du CD par campagne). La stabilité du rapport Calcium/conductivité permet de reconstituer la concentration en calcium en continu à partir des seules mesures de conductivité.

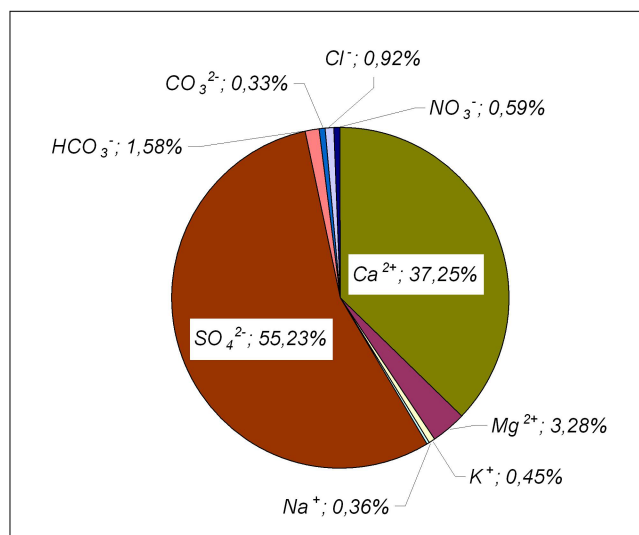


Figure 55 : Contribution des ions à la conductivité d'un échantillon (S1, 2 juin 2014) de l'eau du CD –Chauconin

Le pH de l'eau varie entre 8 et 11 dans l'année et selon les points de prélèvement. Toutefois il reste stable pour les campagnes t1 et t5 compte tenu de l'incertitude de mesure (0.2 unité pH en condition de terrain).

La valeur médiane de l'alcalinité varie peu d'une campagne à l'autre, autour de 0.4 mM. A l'intérieur de chaque campagne la variabilité est plus importante et varie, à l'exception de la campagne t5, de 0.1 à 1.1 mM. Les campagnes t3 et t4 sont les plus homogènes, avec un écart interquartile de 0.3mM.

La dureté de l'eau du CD est supérieure à 48°f (1°f = 10 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ), 1,6 fois plus élevée que la valeur publiée pour l'eau souterraine dans la région de Chauconin: 20 à 35°f (IDF. ars.santé, 2014). Cette valeur élevée confirme qu'il s'agit d'eaux distinctes, l'eau du CD étant plus chargée en calcium. Il est envisageable que le calcium provienne des gypses, dolomie et calcite, présents dans les matériaux rapportés de la plateforme et le calcaire du matériau drainant au-dessus du CD. Leurs contributions à la dureté de l'eau du CD restent à étudier dans les conditions du fonctionnement hydraulique du système. Ces études sont présentées dans le chapitre 8 à l'aide des données des capteurs présentés au chapitre 6.

L'évolution de la dureté le long du CD (campagnes t1 à t5, Figure 56), montre une évolution amont-aval. Deux phénomènes inverses dans le CD de 800 m peuvent être observés :

- du regard S1 à S6±1 la dureté diminue de l'amont vers l'aval ;
- du regard S6±1 à l'exutoire : la dureté augmente de l'amont vers l'aval.

La campagne t5 est atypique, car effectuée longtemps (13 jours) après un événement pluvieux, en fin d'écoulement lent. Le débit dans le CD est quasiment nul. Le niveau de l'eau de la plateforme est en dessous du niveau des fentes de l'entrée du CD. Dans cette configuration de terrain sec, le CD est un système fermé vis-à-vis des sources d'eau externes. La diminution de la dureté traduit la disparition du calcium qui ne peut s'expliquer que par la précipitation de la calcite long du CD. Pour les 4 autres campagnes, soit le terrain n'est pas sec (des infiltrations alimentent le CD après quelques jours de pluie), soit le niveau de l'eau de la plateforme dépasse le niveau des fentes du CD et il y a alors une source externe.

En comparant dureté et alcalinité, on trouve que pour chaque campagne, le ratio entre la différence maximale de dureté et celle de l'alcalinité, le long du CD, varie de  $0,8 \pm 0,1$ . Dans la gamme de pH élevé où nous nous trouvons, ce ratio se situe théoriquement entre 0,5 (évolution de  $\text{Ca}^{2+}$  lié à  $\text{HCO}_3^-$ ) et 1,0 (évolution de  $\text{Ca}^{2+}$  lié à  $\text{CO}_3^{2-}$ ). Les résultats de nos différentes analyses sont donc cohérents entre eux.

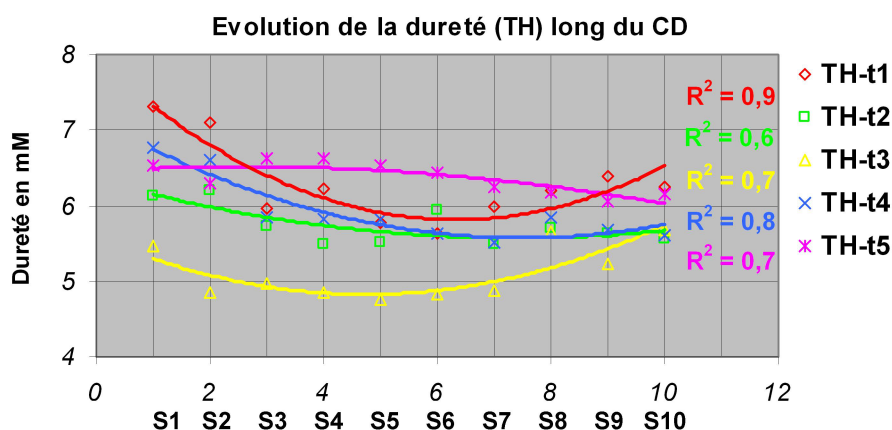


Figure 56 : Evolution de la dureté de l'eau le long du CD –Chauconin

L'état thermodynamique de l'eau vis-à-vis la calcite ( $\Omega$ ) évolue bien évidemment en fonction de la campagne d'analyse, c'est-à-dire que tous les paramètres chimiques évoluent en fonction du temps, mais sans qu'une variation saisonnière puisse être observée. Par ailleurs, lors d'une même campagne, l'état thermodynamique de l'eau vis-à-vis de la calcite évolue significativement le long du CD sauf pour la campagne t5 dont les paramètres chimiques évoluent inférieurement à 10% de la médiane.

Comme le CD et le matériau de plateforme qui l'entoure sont homogènes sur toute sa longueur, si aucune réaction physico chimique ne se produisait, alors la variabilité des mesures au cours d'une campagne serait égale à l'incertitude liée à la mesure et aux analyses. Au contraire nous observons sur certains paramètres, en particulier sur le degré de saturation de la calcite, sur les campagnes du 2 juin 2014, du 19 novembre 2014 et du 17 mars 2015, une variation très élevée de presque un ordre de grandeur. Seule une évolution de nature physico chimique peut produire une telle variation.

## **7.2 Recherche de l'origine de l'eau du CD par modélisation inverse**

### **7.2.1 Choix du logiciel à utiliser**

La force ionique ( $I$ ) de l'ensemble des 50 échantillons de l'eau du CD est comprise entre 19 et 29 mM. Ces valeurs sont bien inférieures à 0,5M, la limite supérieure pour appliquer l'Équation de Debye-Hückel et pour calculer les coefficients d'activité des ions (Michard, 2002). Dans ce cas-là, l'étude thermodynamique et cinétique de l'eau du CD vis-à-vis de la précipitation de phases minérales peut être menée avec l'un des logiciels utilisés dans la recherche : Minteq, Jchess ou Phreeqc. Ils nécessitent l'utilisation de bases de données thermodynamiques et cinétiques. Les plus reconnues sont « Minteq », « Wateq4f », « Phreeqc » et « Chess » (Pokrovsky et al., 2005; Vercouter et al., 2015). Ces bases des données sont légèrement différentes quant à l'exhaustivité des phases minérales prises en compte et des valeurs expérimentales proposées. Cependant, ces bases de données sont généralement incorporées dans chaque logiciel à l'exception de Chess qui n'est disponible que dans Jchess.

Parmi les trois logiciels proposés, Minteq et Jchess ont une interface graphique pour les utilisateurs (GUI) qui aide à paramétrer les calculs et les simulations. Minteq2.0 et Jchess2.0 proposent de prendre en compte plusieurs dizaines de phases minérales par simulation. Phreeqc3.0 propose six phases minérales courantes par défaut. Phreeqc3.0 a également une grande flexibilité qui consiste à compléter ses bases de données et à créer des études de cas personnalisées. C'est un grand avantage quand on étudie une problématique dans un contexte spécifique. De plus, il est open –source ce qui favorise les échanges dans la communauté pour la résolution de cas spécifiques.

Dans le cadre de l'étude thermodynamique et cinétique de la précipitation de la calcite dans le CD, le logiciel Phreeqc3.0 a été choisi afin de calculer l'indice de la saturation ( $SI = \log \Omega$ ) des phases minérales et les équilibres des espèces (ionique ou moléculaire) du calcium et carbone.

## 7.2.2 Sursaturation des phases minérales et précipitation de la calcite

Comme la concentration de calcium est équivalente à celle des sulfates, 5 à 10 fois plus grande que l'alcalinité totale, la précipitation de la calcite est limitée par la concentration de carbonates dans l'eau qui dépend de l'alcalinité et du pH. Ainsi un échantillon représentatif de l'eau du CD peut-être caractérisé par trois paramètres : le calcium (~ 5,5 mM), l'alcalinité (~1,3 mM) et le pH (< 9), l'alcalinité mesurée étant essentiellement composée de bicarbonates (>98% en molarité). La simulation des espèces dissoutes du système calco-carbonaté du CD sur la base de la composition de l'échantillon S3 du 08/07/2015 est présentée Figure 57. La Figure 58 quand à elle présente l'indice de saturation (SI) calculé à partir des phases minérales (calcite, dolomite et gypse) et du CO<sub>2</sub> dissout (CO<sub>2</sub> aq.).

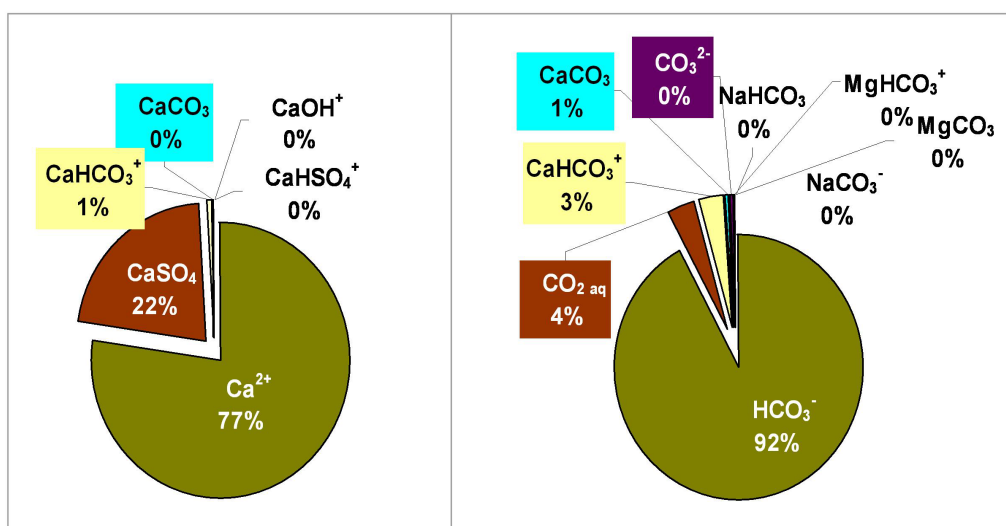


Figure 57 : Formes du calcium et du carbone dans l'eau du CD - regard S3 du 08/07/2015-Chauconin (résultat de simulation)

D'après cette simulation (Figure 57):

- 77% du calcium est sous forme de calcium ionique (Ca<sup>2+</sup>), 22% est sous forme de sulfate de calcium moléculaire (CaSO<sub>4</sub>), 1% sous forme d'hydrogénocarbonate de calcium avec une valence positive de 1 (CaHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>), et le reste sous des formes en quantité négligeable.
- 92% du carbone est sous forme d'hydrogénocarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 4% de sous forme de CO<sub>2</sub> dissout (CO<sub>2</sub> aq). Phreeqc ne fait pas la différence entre le CO<sub>2</sub> aq libre dans l'eau sous la forme de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. 3% du carbone est sous forme de CaHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> et 1% en CaCO<sub>3</sub> dissout en molécule.

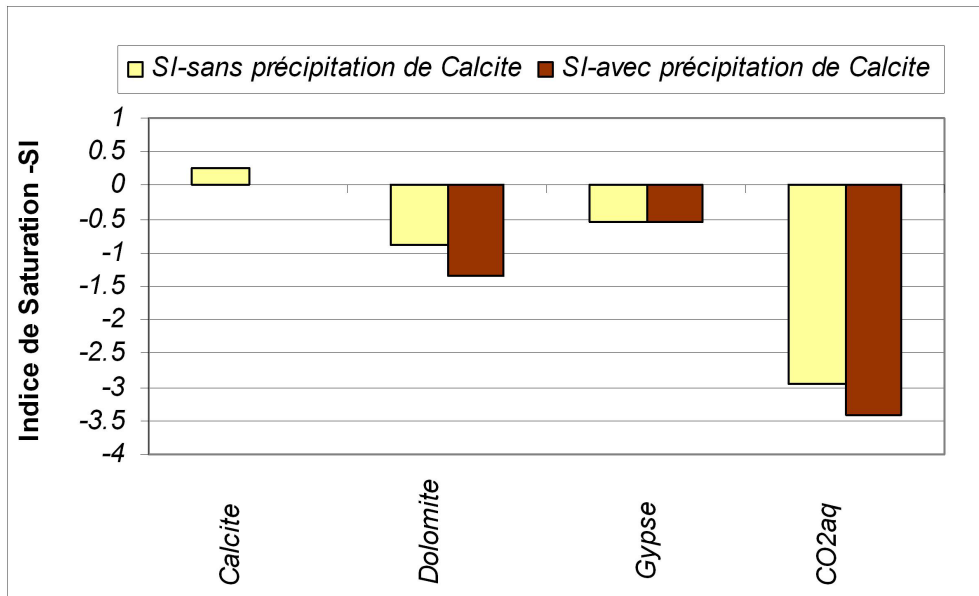
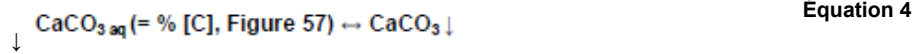


Figure 58 : Indice de saturation des phases minérales de l'eau du CD - regard S3 du 08/07/2015-Chauconin (résultat de simulation)

D'après le calcul de l'indice de la saturation (SI) (Figure 58) dans Phreeqc, cette eau est légèrement sursaturée vis-à-vis de la calcite ( $0 < SI < 1$ ) ; sous saturée vis-à-vis de la dolomite et du gypse ( $SI < 0$ ). Cette eau est aussi sursaturée en  $CO_2$  ( $pCO_2$  aquatique =  $10^{-2.95}$  atm, soit environ 1100ppm) vis-à-vis de la  $pCO_2$  atmosphérique ( $10^{-3.4}$  atm, soit environ 400ppm). Dans le cas de l'eau du CD, équilibrée avec ces trois minéraux et avec la  $pCO_2$  atmosphérique (~400 ppm), la calcite va précipiter de 0,34 mM dans le CD, et un dégazage de  $CO_2$  de 0,36mM aura lieu. Concernant la calcite précipitée :

- 80% vient de l'Équation 2 (les équations sont rappelées ci-dessous), 5% de  $HCO_3^-$  initial participe à cette réaction dont la moitié contribue à la formation de calcite et l'autre moitié se transforme en  $CO_2$  et  $H_2O$  en consommant le  $H^+$  dans l'eau ;
- 5% vient de l'Équation 3 (réaction entre  $Ca^{2+}$  et  $CO_3^{2-}$ ). L'Équation 3 indique que le  $Ca^{2+}$  est associé à  $CO_3^{2-}$  puis forme les micros germes de calcite dans l'eau ;
- 12% vient de l'Équation 4. L'Équation 4 décrit le processus d'agglomération des micros germe de  $CaCO_3$  du  $\mu m$  au mm et qui sédimentent sous l'effet de la gravité.



Cette eau est claire tout au long de l'année, tout le long du CD. La teneur en matières en suspension (MES) montre une valeur très faible qui est autour de 0,6 mg/l ( $\sim 10^{-3}$  mM). Ces traces de MES excluent aussi la possibilité d'une grande contribution de l'Équation 4 : peu de fines de  $\text{CaCO}_3\text{aq}$ . (5 à 500  $\mu\text{m}$ ) existent dans l'eau du CD. Au final c'est le processus décrit par l'équation 1 qui est dominant. Toutefois, la présence de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  implique l'existence à l'amont du CD de processus de dissolution d'un matériau carbonaté.

### 7.2.3 Le CD : un système ouvert ou fermé ?

Dans le but de répondre cette question, on réalise quatre simulations (Test 1 à Test4) qui correspondent aux quatre situations extrêmes vis à vis de l'accès aux sources de calcium et de carbone:

- Test 1 : fermé à la  $\text{PCO}_2$  atmosphérique et fermé à la source de calcaire externe

$\Sigma\text{C}$ constante ;	$\Sigma\text{Ca}$ constante
$\Sigma\text{C} = \text{CO}_{2\text{aq}} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{CaCO}_{3\text{aq}} + \text{CaHCO}_3^+ + \text{MgCO}_3 + \text{MgHCO}_3^+ + \text{NaHCO}_3 + \text{NaCO}_3^-$	
$\Sigma\text{Ca} = \text{Ca}^{2+} + \text{CaHCO}_3^+ + \text{CaCO}_{3\text{aq}} + \text{CaHSO}_4 + \text{CaSO}_4 + \text{CaOH}^+$	

- Test 2 : ouvert à la  $\text{PCO}_2$  atmosphérique et fermé à la source de calcaire externe

$\text{P}_{\text{CO}_2}$ atmosphérique constante ; $\Sigma\text{C}$ varie ;	$\Sigma\text{Ca}$ constante
---	-----------------------------

- Test 3 : fermé à la  $\text{pCO}_2$  atmosphérique et ouvert à la source de calcaire externe

$\Sigma\text{C}$ constante ;	$\Sigma\text{Ca}$ varie
------------------------------	-------------------------

- Test 4 : ouvert à la  $\text{pCO}_2$  atmosphérique et ouvert à la source de calcaire

$\text{P}_{\text{CO}_2}$ atmosphérique constante ; $\Sigma\text{C}$ varie ;	$\Sigma\text{Ca}$ varie;
---	--------------------------

Dans chacune de ces configurations, des simulations sont menées à l'aide de Phreeqc, sur la base de la composition de l'eau de l'échantillon représentatif S3 du 08/07/2015 en faisant varier le pH initial de l'eau de 5.5 à 11, et la température est fixée à sa valeur initiale (17.5°C) dans l'ensemble du calcul.

Dans chacun de ces cas, l'évolution de l'eau du CD en fonction du pH est estimée par le calcul de la calcite précipitée ( $\Delta\text{CaCO}_3$ ), le dégazage de  $\text{CO}_2$  ( $\Delta\text{CO}_2$ ), le pH et la  $\text{pCO}_2$  aquatique à l'équilibre (pHe et  $\text{pCO}_2$  aq\_e). Les résultats de ces calculs sont illustrés dans la Figure 59. Les résultats de la comparaison de ces quatre tests deux par deux sont donnés dans le Tableau 36.

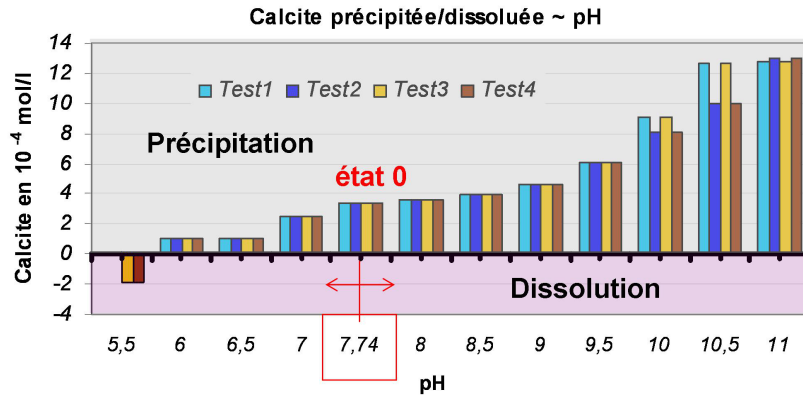
D'après ces quatre simulations, on observe trois zones de pH :

- Zone 1 :  $\text{pH} < 6$  (pas de calcite précipitée) ;
- Zone 2 :  $6 \leq \text{pH} < 10$  (pas de variation entre les quatre cas tests);
- Zone 3 :  $\text{pH} \geq 10$  (la quantité de calcite précipitée est plus importante en système ouvert qu'en système fermé).

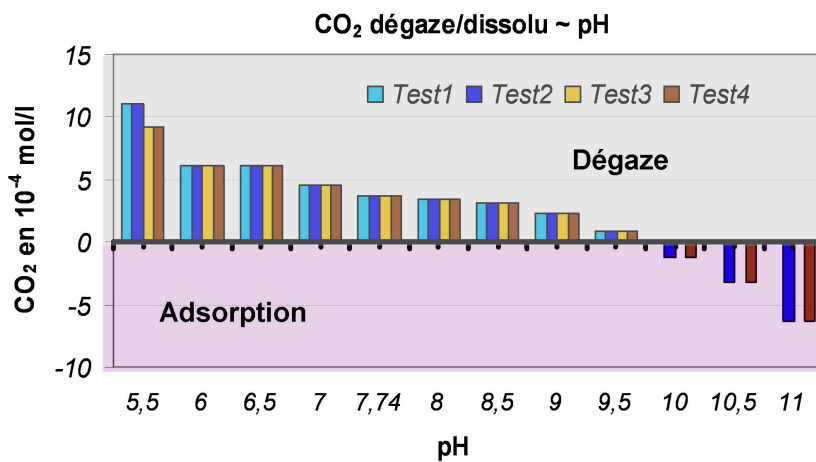
Pour le pH dans les zones 1 et 3, les quatre paramètres simulés ( $\Delta\text{CaCO}_3$ ,  $\Delta\text{CO}_2$ , pHe et  $\text{pCO}_2$  aq\_e) varient selon la condition du test (ouvert ou fermé à la calcite externe ou la  $\text{pCO}_2$  atm). Par contre, si le pH de l'eau varie entre 6 et 10, les autres variables sont indépendantes de la condition du test. C'est-à-dire que l'eau testée va toujours conduire à la même quantité de calcite précipitée, de  $\text{CO}_2$  dégazé, et rester au même pH et  $\text{pCO}_2$  aq à l'état thermodynamique de l'équilibre, peu importe que l'on opère dans un système fermé ou ouvert.

Indépendamment de la condition du système ouvert ou fermé à la pression partielle de  $\text{CO}_2$  atmosphérique au niveau du calcium et du carbone, une fois que le pH dépasse 6, l'eau du CD évolue dans le sens de précipitation de la calcite, et plus le pH est élevé, plus la calcite précipite (Figure 59a). Le dégazage apparaît à un pH inférieur à 10 (Figure 59b). Cette eau va commencer à absorber le  $\text{CO}_2$  dans l'air si le pH dépasse 10.





a)



b)

Figure 59 : L'évolution de l'eau du CD en fonction du pH- simulation thermodynamique

NB : ouvert (1), fermé (0) ; calcite externe (A) ; PCO<sub>2</sub> atmosphérique (B)  
 Test1 – A0B0 ; Test2 – A0B1; Test3 – A1B0 ; Test4 – A1B1

Tableau 36 : Comparaison deux à deux des résultats simulés des tests 1 à 4  
 (0 = résultats identiques, 1 résultats différents)

pH	test1-2	test1-3	test1-4	test2-3	test2-4	test3-4
5,5	0	1	1	1	1	0
6	0	0	0	0	0	0
6,5	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
7,74	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
8,5	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
9,5	0	0	0	0	0	0
10	1	0	1	1	0	1
10,5	1	0	1	1	0	1
11	1	0	1	1	0	1

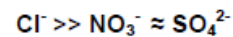
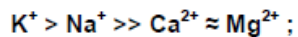
Dans la zone extrême alcaline (pH >10), quand l'eau arrive à l'état d'équilibre (SI=0) dans un système fermé à la pCO<sub>2</sub> atmosphérique, la précipitation de la calcite s'arrête quand tout le CO<sub>2</sub> aquatique est transformé en carbonate (pCO<sub>2</sub> aq > 10<sup>-7</sup> atm), mais l'eau finale peut toujours rester au pH élevé (10 à 11). Par contre, dans un système ouvert à la pCO<sub>2</sub> atmosphérique, cette tendance vers l'équilibre va conduire à une eau avec un pH final autour 8.

### 7.3 Recherche par modélisation de l'origine des eaux qui alimentent le CD

Dans ce paragraphe, en utilisant la modélisation physico-chimique, nous recherchons l'origine des eaux présentes dans le caniveau drainant et particulièrement si il s'agit d'eau infiltrée dans la plate-forme ou de ruissellement d'eau de pluie ayant rejoint le CD par transfert dans le matériau drainant. On recherche tout d'abord la composition chimique des eaux en fonction de leurs différentes origines possibles (infiltration ou ruissellement).

#### 7.3.1 Capacité de dissolution des matériaux par l'eau de la pluie

D'après les trois campagnes réalisées en 2016, le pH de la pluie collectée est autour de pH 8; la conductivité varie entre 50 et 200µS/cm. Les ions majeurs sont listés dans l'ordre de concentration décroissante :



L'analyse détaillée est présentée dans l'annexe 6. A l'exception de K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup> dont les concentrations sont de l'ordre de 10<sup>-1</sup> mM, les autres ions sont à des concentrations négligeables (< à ~10<sup>-2</sup> mM).

Les eaux de ruissellement pluvial sont soit transférées vers le CD via le matériau drainant, soit infiltrées dans le matériau de plate-forme. La composition de ces deux matériaux encaissants a été analysée (cf. chapitre 6) :

- Le matériau drainant comprend plus de 90% de calcite;
- Le matériau de la plate-forme comprend plus de 80% de calcite et dolomite. Le matériau de plate-forme a été traité à la chaux (1%). Des simulations sont menées dans les deux hypothèses extrêmes : chaux restante nulle (0%) et chaux restante égale à la chaux initiale (1%).

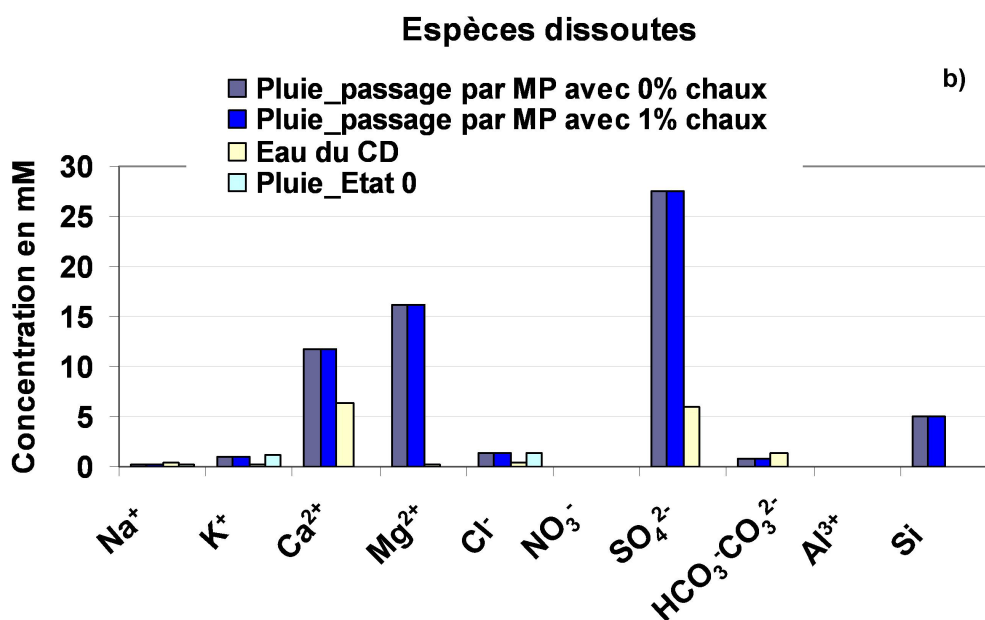
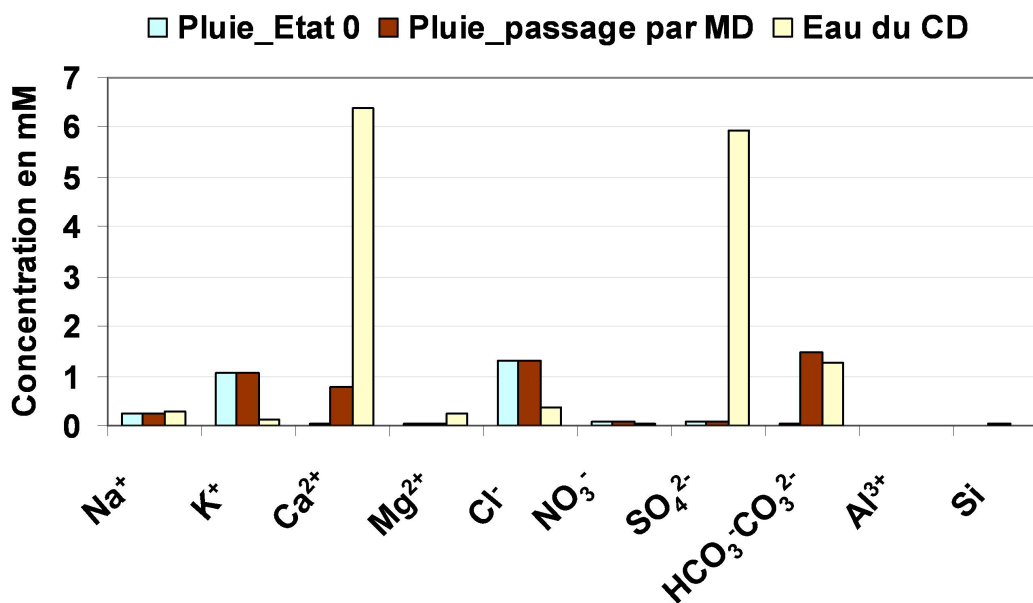
La Figure 60 montre le résultat de la simulation avec Phreeqc de la capacité de dissolution des matériaux encaissants par l'eau de pluie (échantillon de la pluie du

19/02/2016) en prenant en compte les ions suivants :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cmin} = \text{somme}(\text{HCO}_3^- \text{ et } \text{CO}_3^{2-})$ ,  $\text{SiO}_2$ . La Figure 60a présente les résultats pour le matériau drainant et la Figure 60b pour le matériau de plate-forme dans les deux hypothèses extrêmes.

La Figure 61 présente le bilan de précipitation /dissolution des phases solides minérales pour les trois cas simulés. A partir de ces trois simulations, on observe que :

- La capacité de dissolution du matériau de plate-forme par l'eau de pluie, quelque soit sa teneur en chaux, est bien supérieure à la capacité de dissolution du matériau drainant, compte tenu de la différence de perméabilité des matériaux ;
- Sous l'effet du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, dans le matériau drainant très majoritairement constitué de calcite, se produit une dissolution de cette calcite ;
- Dans le matériau de plate-forme se produit une dissolution du gypse et de la dolomite, qui conduit à une précipitation de calcite dans le matériau drainant ou le caniveau drainant ;
- Le traitement à la chaux jusqu'à 1% du matériau de plateforme peut conduire dans le matériau drainant ou dans le collecteur drainant à une précipitation de la calcite supérieure de 30% ;
- La composition simulée des eaux en contact avec le matériau de plate forme est semblable (Figure 62) à la composition des eaux prélevées en hiver sur les piézomètres (5 prélèvements sur P1, 1 prélèvement sur P2 entre 2013 et 2016). Cela nous confirme l'origine météorique suivie d'une infiltration des eaux présentes dans la plateforme.

La Figure 62 présente en synthèse la composition chimique des eaux prélevées et mesurées et la composition des eaux en contact avec les matériaux du site, simulées par Phreeqc.



**Espèces dissoutes**

Figure 60 : Composition chimique de l'eau de pluie(Pluie\_Etat 0) et de l'eau de pluie en équilibre avec les matériaux encaissant et l'eau du CD. a) eau de pluie en contact avec le matériau drainant (MD). b) eau de pluie en contact avec le matériau de plateforme (MP) avec (1%) ou sans chaux.

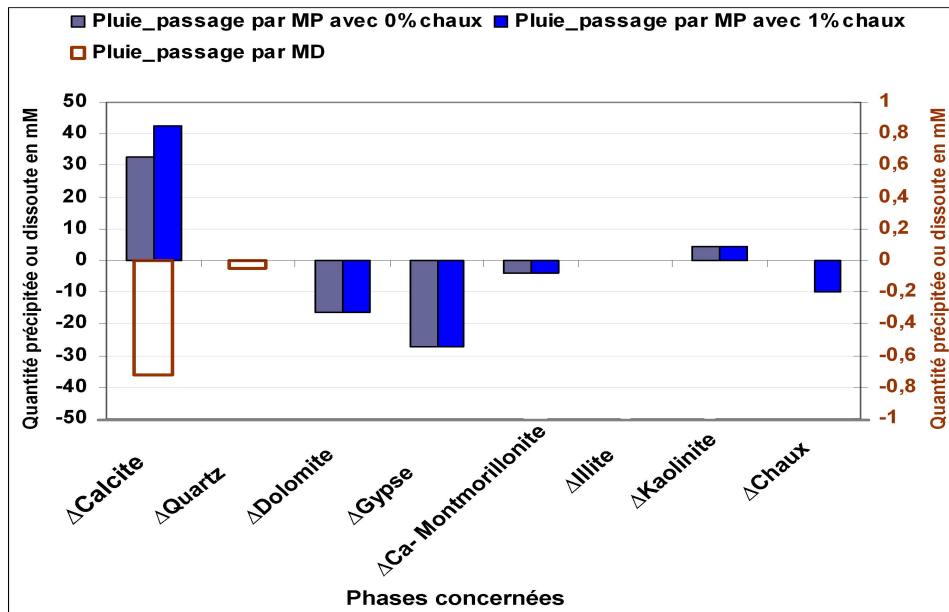


Figure 61 : Bilan des dissolutions-précipitations des phases solides

NB : MD – matériaux drainant ; MP-matériaux de la plate-forme ; l'axe de Y : (+) formation d'un minéral ; (-) dissolution

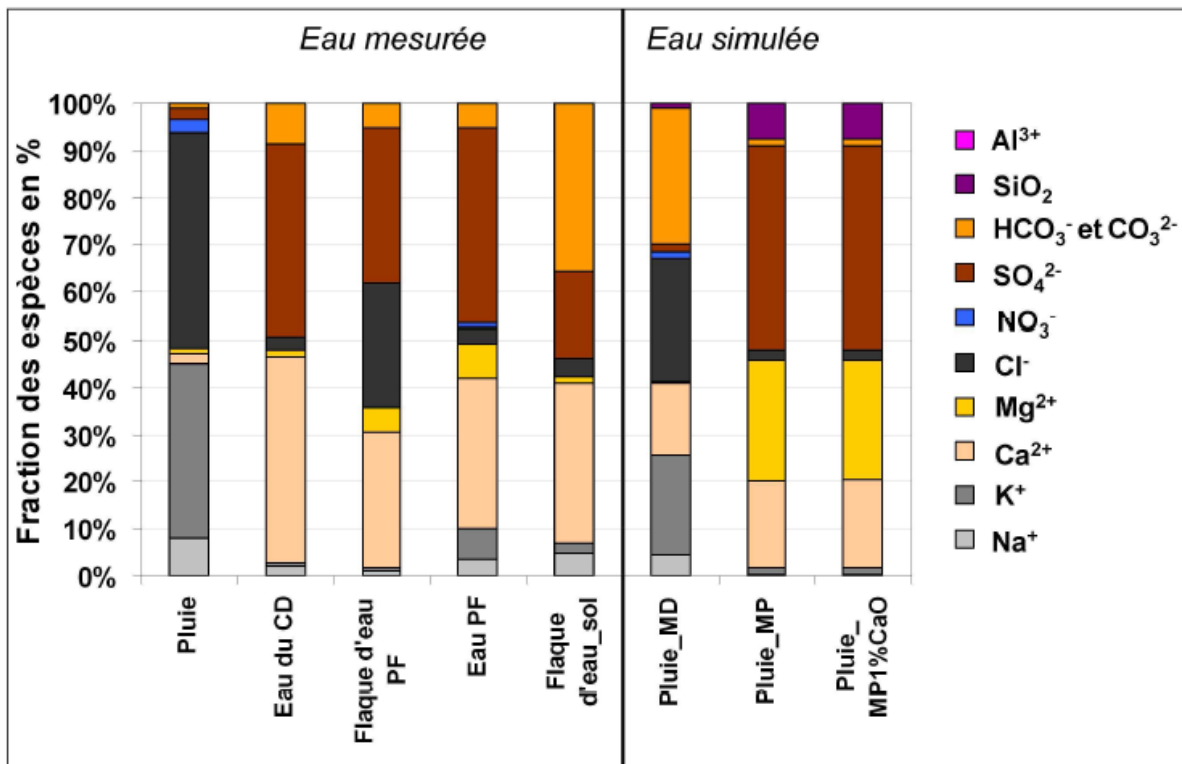


Figure 62 : Comparisons des espèces dissoutes dans différentes eaux par mesure et simulation

NB : CD- collecteur drainant ; MD – matériaux drainant ; MP-matériaux de plateforme ; PF-plateforme

## **7.4 Simulation de l'origine de l'eau du CD par la modélisation inverse**

D'après l'étude précédente, il existerait deux sources externes d'eau en contact avec les matériaux encaissants et rapportés qui contribuent à la formation de l'eau du CD :

- la pluie ;
- l'eau de pluie infiltrée dans la plateforme (à la position du piézomètre P1).

Les deux sources ne sont pas indépendantes, à savoir que l'eau contenue dans P1 est une fraction de la pluie infiltrée dans les structures d'assise de la piste, nous avons donc réalisé des tests de modélisation inverse en considérant une source d'alimentation unique. Sur la base de la composition de l'eau du CD, mesurée, nous recherchons les différentes possibilités de dissolution/précipitation au sein du matériau drainant et du matériau de plateforme, qui peuvent amener la composition de l'eau de pluie à évoluer jusqu'à la composition observée de l'eau dans le CD. Pour cela nous prenons en compte les différents processus d'interaction entre ces matériaux et l'eau de pluie, tels qu'ils ont pu être mis en évidence dans les paragraphes précédents.

### **7.4.1 Simulation inverse du système avec une source d'alimentation unique**

Dans cette simulation les conditions limites sont les compositions de l'eau du CD et de l'eau de pluie et les différentes phases solides des différents matériaux encaissant : matériau drainant et matériau de plateforme.

Les contraintes imposées pour cette simulation sont les suivantes :

- équilibre de masse pour chaque solution (source d'eau);
- équilibre de charge pour chaque solution ;
- équilibre électronique pour l'ensemble de système (l'eau et phases) ;
- équilibre de l'eau formée et consommée dans le système.

Le fichier d'entrée correspondant de Phreeqc est disponible en annexe 2. Les résultats sont présentés dans le Tableau 37. Phreeqc identifie huit combinaisons de dissolution précipitation des matériaux compatibles avec les compositions de l'eau de pluie et de l'eau du CD.

Il importe de déterminer sur la base des observations, en particulier de précipitation de la calcite quelle combinaison parmi les 8 possibles se produit sur le site de Chauconin.

D'après le Tableau 37, la seule combinaison proposant la précipitation de calcite est la combinaison 1. C'est donc elle qui est retenue pour décrire le fonctionnement de notre système.

Tableau 37 : Résultat de la simulation inverse de l'eau du CD pour une source unique d'alimentation à partir de l'eau de pluie :

Phases	Composition	Résultats qualitatifs de la simulation pour les 8 combinaisons proposées par Phreeqc
Quartz	SiO <sub>2</sub>	+++++++
Gypse	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	+++++++
Illite	K <sub>0.6</sub> Mg <sub>0.25</sub> Al <sub>2.3</sub> Si <sub>3.5</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	+0+++0-
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	+++++++
Ca-montmorillonite	Ca <sub>0.165</sub> Al <sub>2.33</sub> Si <sub>3.67</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-----
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	-+++00++
Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	+++++++
Chaux	CaO	+++++.-+
CO <sub>2</sub> (g)	CO <sub>2</sub>	+00+++.-0

NB : Dans la colonne de résultats, les résultats des huit combinaisons sont présentés successivement de manière qualitative avec (+) dissolution de minéral ; (-) précipitation ; (0) équilibre

Elle comprend :

- la dissolution de quartz, de gypse, d'illite, de kaolinite, de la dolomite et de chaux ;
- la précipitation de Ca-montmorillonite et de calcite ;
- l'augmentation de la pression de CO<sub>2</sub> dissous.

En résumé, pour concevoir le futur modèle quantitatif et hydrogéochimique (chapitres 8 et 9), la combinaison retenue de la combinaison 1. Toutefois, certains des minéraux pris en compte ne sont présents que dans la partie supérieure de terrassement (PST) traitée, imperméable. La sous-couche et la couche de forme, situées au dessus sont en contact avec l'eau (voir piézomètre P1) et ne comprennent pas ces minéraux. Le modèle pourra donc être simplifié et n'inclure que quartz, gypse et dolomite et bien sur la calcite et le CO<sub>2</sub> dissous.

Comme le quartz n'influe pas l'équilibre thermodynamique du système calco-carbonique, et que les deux minéraux gypses et dolomite sont absents du matériau

drainant, cette simulation permet de mettre en évidence la contribution des minéraux de la plateforme à la composition de l'eau du CD.

## 7.5 Conclusions préliminaires sur le système du CD

### 7.5.1 Thermodynamique de l'ensemble de l'eau analysée

D'après les analyses d'eau, on conclut que l'eau du CD a un faciès chimique sulfaté-calcique, similaire à celui de l'eau du piézomètre P1 installé dans la plateforme.

D'après les simulations réalisées, on retient les éléments suivants :

#### a) Saturation :

- L'eau de la plateforme a une capacité de dissolution du gypse de la plateforme (SI = -0.5) ;
- L'eau du CD est sursaturée en calcite, et a une capacité maximum de formation de 1,5 mM de calcite dans le CD avec SI ~ 1.

#### b) pH :

- Tout d'abord, il est mis en évidence un seuil de pH (6, Figure 59) à partir duquel l'équilibre calco-carbonique est modifié sur le site de Chauconin ;
- Dans le cas d'un pH >6 (cas réel sur le site), l'eau du CD a toujours une capacité de précipitation de la calcite ;
- Dans le cas d'un pH <6, la calcite se dissout au contact de l'eau du CD.

#### c) Relation avec la pCO<sub>2</sub> atmosphérique :

- La simulation thermodynamique (système ouvert - fermé) a mis en évidence que le CD est un système fermé, sans échange de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ce résultat a été confirmé par l'observation de variations rapides de pH (échelle horaire) comme décrit au chapitre 6 ;
- Cette simulation montre également que sur le long terme (échelle journalière), le système fonctionne comme un système ouvert et l'eau du CD s'équilibre avec la pCO<sub>2</sub> atmosphérique, le pH se stabilisera autour de 8±0,2 pH ;



- L'eau dans le piézomètre P1 est sursaturée en CO<sub>2</sub> dissout. Lorsqu'elle rentre en contact avec l'eau du CD qui a une pCO<sub>2</sub> plus faible, va se produire une précipitation de la calcite.

### **7.5.2 Origine de l'eau d'alimentation du CD**

A partir des résultats des simulations précédentes, on conclut que :

- L'eau d'alimentation du CD est un mélange de l'eau infiltrée de la plateforme et de la pluie ayant traversée le matériau drainant. Cette source conduit à la précipitation de la calcite dans le CD.
- La composition de l'eau dans le piézomètre P1 résulte de l'équilibre chimique de l'eau de pluie avec les minéraux du matériau de plateforme. Ce résultat sera confirmé sur la base d'arguments d'ordre hydraulique dans le chapitre 8.

En résumé, le modèle inverse permet de mettre en évidence les processus majeurs qui se produisent sur le site de Chauconin. Ces processus sont la dissolution des minéraux du matériau de plateforme, qui permettent ensuite, dans le caniveau drainant la précipitation de la calcite, avec dégazage de CO<sub>2</sub>. Pour quantifier ces processus, surtout la contribution de chaque fraction d'eau (celle traversant les matériaux drainant et celle provenant de la plateforme), un modèle dynamique (hydrogéochimique) est nécessaire (voir chapitre 8).

## **Chapitre8 Hydrodynamique et hydrochimie du système de drainage**

Ce chapitre vise à analyser le fonctionnement physique des processus ayant lieu dans le système comprenant la surface et le sous-sol du bassin versant relatif au tronçon du collecteur drainant (CD) instrumenté à Chauconin. L'analyse est faite par simulation du fonctionnement hydrologique du bassin versant ferroviaire sur la base d'une adaptation du modèle empirique « GR4H », version horaire du modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers (GR4J) développé par l'IRSTEA. En particulier plusieurs épisodes de pluie représentatifs de ceux rencontrés durant la période de suivi sont simulés (calage et vérification).

Dans la deuxième partie du chapitre, sur la base de la simulation du sous-système physique, et des observations de qualité chimique de l'eau, différents modèles de représentation du fonctionnement hydrochimique du système sont proposés. Ils sont analysés dans le chapitre 9 au moyen du logiciel « Phreeqc » (Parkhurst, 1995).

### **8.1 Différents types d'écoulement et fractions volumiques théoriques**

Comme décrit dans le chapitre 6 (§6.1.7), l'hydrogramme observé à la sortie du collecteur drainant, se compose de la superposition d'un hydrogramme correspondant à un écoulement rapide et d'un hydrogramme correspondant à un écoulement lent. L'écoulement rapide se traduit après un épisode pluvieux par une montée et une décroissance rapide du débit (quelques heures). L'écoulement lent se traduit par une rupture de la pente de la courbe de décrue et peut durer plusieurs jours.

D'après la configuration (coupe transversale) du système de drainage décrit dans le chapitre 4 (§ 4.3.2) et la description des caractéristiques des matériaux dans le chapitre 6 (§6.1.2), nous comprenons que :

- l'écoulement rapide est généré par la fraction d'eau qui ruisselle sur la plateforme et qui traverse les matériaux drainants (perméables),
- l'écoulement lent est généré par la fraction d'eau qui s'infiltre dans la plateforme (peu perméable) de la voie de service.

On a représenté les écoulements « rapides et lents » dans la Figure 63a (coupe du CD).

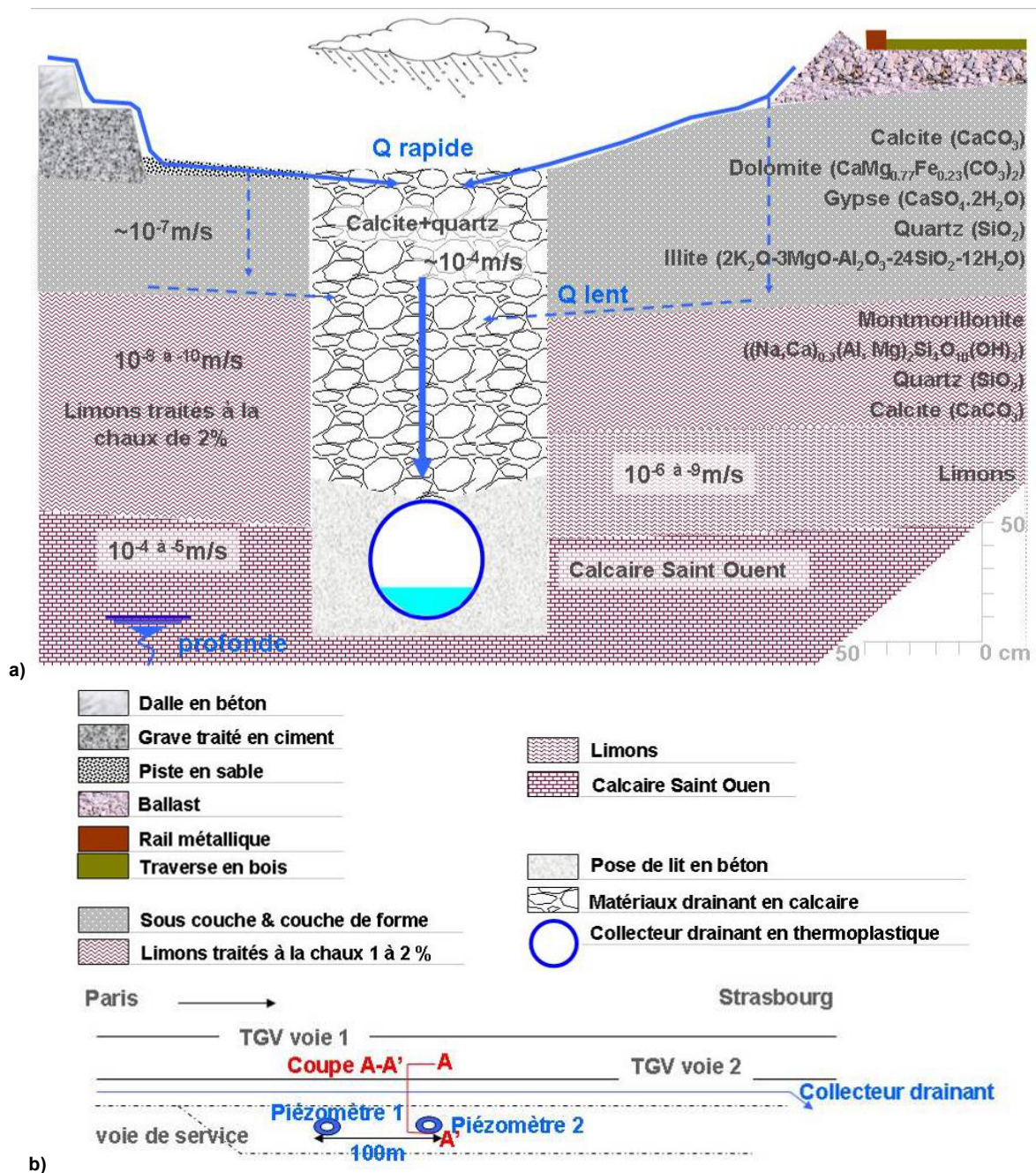


Figure 63 : théorie des parcours d'eau interne de la plateforme- Chauconin  
NB : a) Coupe A-A' du CD ; b) Plan du CD

### 1) Estimations théoriques des fractions du ruissellement

Selon le code de la conception IN3278 (SNCF, 2006), du côté la voie TGV, la présence de la voie sur dalle béton côté voie TGV couverte d'une peinture surfacique d'étanchéité conduit à un ruissellement de la voie de 100%. L'eau, après avoir

ruisselé le long de la pente depuis l'axe de la voie vers la tranchée du collecteur drainant, traverse les matériaux drainants perméables puis est évacuée par le collecteur. Du côté de la voie de service ballastée, le ruissellement de la voie est fixé théoriquement à 85%.

## 2) Estimation théorique de la fraction infiltrée

Du côté de la voie TGV, il n'existe en théorie (SNCF, 2006) aucune infiltration de la plateforme vers la couche de grave, la couche de forme et les autres couches plus profondes. Du côté de la voie de service, il est considéré qu'il y a une infiltration interne dans la structure d'assise (la sous-couche et couche de forme). Cette infiltration correspond au maximum à 15% de la pluie nette. Compte tenu des différences théoriques de perméabilité des couches, l'eau infiltrée doit engendrer des écoulements le long de l'interface de ces différentes couches (pente 4%). Cet écoulement inter couches est lentement évacué par le collecteur. Vu la faible perméabilité de la couche de sol traité ( $10^{-8} - 10^{-10}$  m.s-1), on considère qu'aucune infiltration ne se produit dans cette couche.

## 3) Analyse de la dynamique de l'eau dans le sol

La nappe du calcaire de Saint-Ouen est située à une cote inférieure à celle du radier du collecteur drainant et n'interfère pas avec notre système.

Sur la base des niveaux d'eau relevés dans les piézomètres (§ 6.1.6), on constate la présence d'eau temporaire en hiver à l'intérieur de la plateforme de la voie de service dans les piézomètres 1 et 2 (Figure 63b), au dessus de la couche de sol traité. Comme indiqué au chapitre 6 :

- les deux piézomètres P1 et P2 installés dans la plateforme de la voie de service sont à sec en dehors de la période hivernale (décembre à mars) ; cette constatation confirme une présence temporaire de l'eau la plateforme dans les trois premiers mètres sondés par les piézomètres;
- les hauts niveaux d'eau relevés dans les piézomètres 1 et 2 correspondent aux niveaux de la sous-couche et de la couche de forme en hiver ; ce constat confirme notre hypothèse d'un écoulement lent de sub-surface fonction des perméabilités des matériaux constitutifs;
- Il existe une variabilité dans la dynamique du niveau d'eau entre les piézomètres P1 (dynamique lente, variations à l'échelle mensuelle) et P2 (dynamique rapide ; variations à l'échelle hebdomadaire) situés à une toute petite distance de 100 m (Figure 63b) le long de la voie; ce constat souligne l'inhomogénéité de la plateforme. En particulier l'hypothèse d'une perméabilité

constante sur l'ensemble de chaque couche, à l'échelle de notre site est sujette à caution.

Au final, sur la base de ces hypothèses et estimations théoriques, on doit retrouver un hydrogramme à la sortie du CD qui se compose de trois contributions (Figure 64):

- un écoulement de surface rapide : c'est le ruissellement de la plateforme (échelle horaire);
- un écoulement de sub-surface : c'est l'écoulement lent de l'interface des couches de la plateforme (échelle journalière) ;
- un débit de base en période hivernale lié aux écoulements de sub-surface (échelle hebdomadaire).

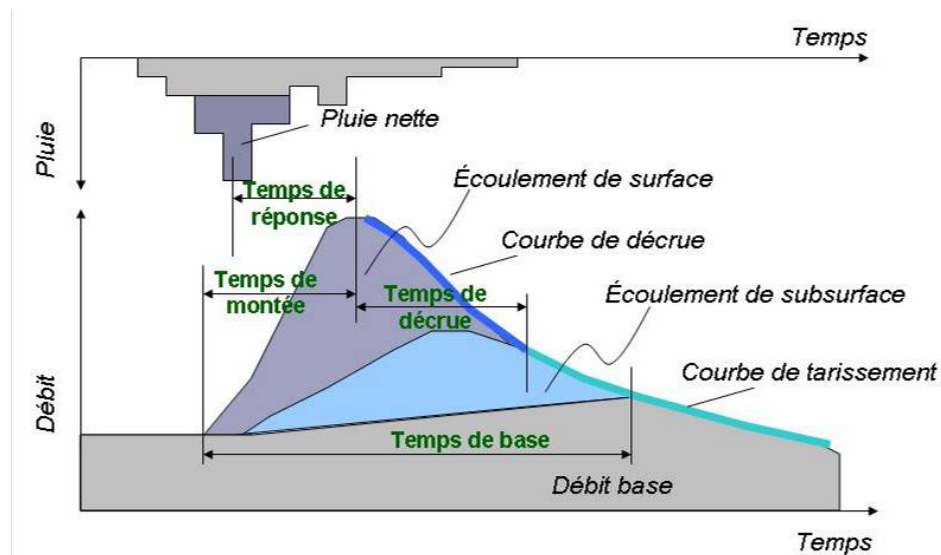


Figure 64 : Hyétoqramme et hydrogramme théoriques d'un épisode pluie-débit à Chauconin

Sur la base de cette représentation conceptuelle, il est possible de faire une analyse statistique pluie - débit et de :

- déterminer le volume d'eau correspondant à chacune des contributions;
- estimer les divers temps caractéristiques de l'hydrogramme (voir Figure 64) qui soulignent la variation des temps de contact de l'eau avec les différents matériaux.

## 8.2 Analyse du fonctionnement dynamique du système.

Dans ce paragraphe, les caractéristiques de l'écoulement rapide et de l'écoulement lent seront estimées par les trois moyens suivants :

- en se basant sur les perméabilités théoriques définies lors de la conception de la voie;
- en analysant les relations pluie – débit ;
- en analysant les évolutions des caractéristiques chimiques entre deux évènements pluvieux (pH, conductivité).

### 1) Analyse basée sur les perméabilités théoriques

La perméabilité du matériau drainant est théoriquement de  $10^{-4}$  m/s. L'épaisseur du matériau est de 1.5m, il faut théoriquement 4.2 heures pour que l'eau atteigne le collecteur drainant. De même, la perméabilité de la sous-couche est en théorie de  $10^{-7}$  m/s. Le temps de traversée de cette couche est théoriquement de 32.4 jours. Par ailleurs, le vieillissement de la voie provoque une augmentation de la perméabilité de cette sous-couche. Aucune estimation de cette augmentation sur LGV n'existe, mais sur ligne classique (Trinh et al., 2011) estiment qu'elle varie de  $2,2 * 10^{-7}$  m/s à  $10^{-6}$  m/s après une cinquantaine d'années de service. On peut considérer un vieillissement assumé plus rapide sur les LGV en raison de la fréquence et la de la vitesse des trains, et de leur charge plus élevée (Lamas-Lopez, 2016).

On considère que la perméabilité de la plateforme de Chauconin sous les voies TGV, aujourd'hui est entre  $10^{-7}$  m/s et  $10^{-6}$  m/s après 10 ans de service. Ainsi le temps de transfert à travers la sous-couche peut-être compris entre 32 j et 3,2 j d'après nos estimations. Enfin, il est aussi envisageable que la perméabilité de la sous-couche dans la zone de la voie de service n'ait pas été tout à fait de  $10^{-7}$  m/s dès la construction de la ligne.

### 2) Analyse des relations Pluie- Débit

Une analyse statistique de l'ensemble des données horaires validées de pluie et débit du 17 juin 2014 à 18h00 au 30 avril 2016 à 23h00 afin de décrire les hydrogrammes (voir Figure 64) est présentée ici.

## 2.1) Estimation de la perte initiale d'un épisode pluvieux

L'estimation de la pluie nette ne peut pas se faire en utilisant le rapport lame d'eau écoulée sur lame d'eau précipitée, car nous avons une incertitude sur la superficie précise du bassin versant d'une part et sur les volumes écoulés à prendre en compte pour chaque évènement pluvieux. Nous allons estimer les pertes initiales en nous basant sur les évènements pluvieux ne produisant pas d'écoulement.

Sur l'ensemble de la période d'acquisition (298 épisodes au total, chapitre – paragraphe 6.1.5), 173 épisodes pluvieux représentant un total de 153 mm ne produisent pas d'écoulement à la sortie du CD. Parmi les épisodes ne produisant pas d'écoulement, il y a 143 épisodes pour lesquels le cumul n'atteint pas 1 mm, et 30 épisodes (parmi 44 épisodes autotale) pour lesquels le cumul est entre 1 et 2 mm. Aussi, la perte initiale est déterminée entre 1 et 2 mm : soit 1,4 mm en moyenne pour ces 30 épisodes.

## 2.2) Caractéristiques volumiques et temporelles de Pluie- débit

Sur l'ensemble des données validées (298 épisodes dont 125 épisodes visibles dans l'hydrogramme du CD), on obtient 57 épisodes séparés au minimum par 8 heures sans basculement d'auget et produisant un écoulement. Après une analyse des caractéristiques pluie-débit, les résultats statistiques de ces 57 épisodes sont donnés dans le Tableau 38 (caractéristiques volumiques) et Tableau 39 (caractéristiques temporelles). Cette durée de 8 heures séparant deux épisodes pluvieux correspond au 3ème quartile des valeurs de temps de montée (Tableau 39). Elle a été choisie pour nous permettre une bonne séparation des hydrogrammes et l'observation de courbes de décrues sinon complètes, du moins représentant les deux tiers du débit de pointe observé.

D'après le Tableau 38, parmi les 57 épisodes pluvieux, 75% ont une durée inférieure à 21 heures, 75% ont une hauteur précipitée inférieure à 12 mm et 75% une intensité horaire maximale qui ne dépasse pas 4 mm/h. Ces pluies engendrent des pics de débit dans le CD dont 75% ne dépasse pas 1,8 l/s. 75% des courbes de tarissement (voir Figure 64) retrouvées sur ces hydrogrammes commencent sous 0,21 l/s (seuil de débit du tarissement). 75% des débits de base retrouvés sur les hydrogrammes du CD sont sous 0,09 l/s. Le 75ème percentile est utilisé pour représenter la plupart des cas in situ sous les valeurs extrêmes (pas représentatif).

**Tableau 38 : Statistiques des caractéristiques volumiques de Pluie – Débit du CD – Chauconin**

Statistiques	durée de pluie en h	somme de pluie en mm	pic intensité de pluie en mm/h	pic débit du CD en l/s	seuil de débit du tarissement en l/s	débit de base de fin du tarissement en l/s	débit avant pluie en l/s
Nombre d'échantillons	57	57	57	57	57	57	57
Valeur_min	2	2.5	1.0	0.06	0.01	0.000	0.001
Valeur_max	43	45.0	8.6	8.08	0.36	0.273	0.301
Valeur_moyenne	15	10.5	3.0	1.57	0.15	0.076	0.065
Erreur standard	1	1.1	0.2	0.24	0.01	0.006	0.008
Variance	101	63.7	2.5	3.30	0.01	0.002	0.003
Déviat ion standard	10	8.0	1.6	1.82	0.09	0.046	0.058
Médian	13	8.6	2.5	0.98	0.15	0.074	0.046
25 percentile	7	5.7	1.8	0.32	0.08	0.051	0.026
75 percentile	21	11.8	3.9	1.80	0.21	0.087	0.091

**Tableau 39 : Statistiques des caractéristiques temporelles de Pluie – Débit du CD – Chauconin**

Statistiques	durée de pluie en h	temps de réponse en h	temps de montée en h	temps de décrue en h	temps de base en h
Nombre d'échantillons	57	57	57	57	57
Valeur_min	2.0	0.0	1.0	4.0	8.0
Valeur_max	43.0	45.0	18.0	38.0	96.0
Valeur_moyenne	15.4	4.9	5.4	15.5	39.9
Erreur standard	1.3	1.1	0.6	1.0	2.6
Variance	101.1	64.8	18.0	52.2	377.3
Déviat ion standard	10.1	8.0	4.2	7.2	19.4
Médian	13.0	2.0	4.0	14.0	37.0
25 percentile	7.0	1.5	2.0	10.5	25.5
75 percentile	21.0	5.0	8.0	18.5	52.5

Sur la base du Tableau 39, il apparaît qu'il y a deux échelles de temps de réponse, la première de quelques heures (75% < 5h) la seconde journalière (45 h max). Par exemple, pour deux épisodes (n°31 et n°33 Figure 67) de caractéristiques proches (durée 16 vs. 14 h ; précipitation 5,8 vs. 3,8 mm ; intensité du pic 1,5 vs. 1,3 mm/h), le temps de réponse du CD passe de 42 h à 14 h. Cette double échelle de temps de réponse du CD souligne aussi deux modes de routage de l'eau : un rapide (échelle horaire) et un lent (échelle journalière).

Sur l'ensemble des 57 hydrogrammes du CD, 75% des hydrogrammes ont une courbe de montée inférieure à 8 h, 75% ont une courbe de décrue inférieure à 18,5 h et 75% ont une durée totale jusqu'à retrouver le débit de base de moins de 52,5 h (2 à 3 jours). Ces processus physiques (Pluie-débit) sont dynamiques et rapides :



l'écoulement de surface est inférieur à 24 heures ; l'écoulement de sub-surface peut durer jusqu'à 4 jours (valeur maximale de 96 h).

### 2.3) Détermination des catégories de pluie et hydrogrammes associés

Pour l'ensemble de ces 57 épisodes, une analyse Pluie-Débit est faite par quatre tests de corrélation: linéaire, linéaire partielle, Spearman et Tau de Kendall. Les premiers deux tests cherchent la relation entre les valeurs, les deux derniers tests (Spearman et Tau de Kendall) consistent à trouver un coefficient de corrélation non linéaire, non pas entre les valeurs prises par deux variables mais entre les rangs de ces valeurs.

Les quatre tests sont faits sur sept mesures (M1 à M7): la durée de la pluie en h (M1), la somme de pluie en mm (M2), le pic d'intensité de la pluie en mm/h (M3), le pic de débit du CD en l/s (M4), le débit de fin de décrue (seuil de tarissement) en l/s (M5), le débit de base de fin de tarissement en l/s (M6), et le débit de base avant la montée de débit à l'intervention d'une pluie en l/s (M7). Les résultats des 4 tests sont donnés dans Tableau 40.

Sur la base de ces résultats statistiques (Tableau 40), trois résultats sont constatés, et ces trois résultats sont validés par les graphiques de nuages de points entre deux mesures (Figure 65 et Figure 66).

Au total, quatre exploitations graphiques sont effectuées : la 1ère, M4 en fonction de M1, M2 et M3 ; la 2ème, M5 en fonction de M1 à M4 ; la 3ème, M6 en fonction de M1 à M5 ; la 4ème, M7 en fonction de M1 à M6. Pour l'ensemble des résultats, on observe que :

- parmi les trois caractéristiques de la pluie (durée, somme, et intensité du pic), le débit de pointe à la sortie du CD pendant chaque évènement pluvieux varie linéairement en fonction de la hauteur d'eau de l'évènement pluvieux (Figure 65). Le coefficient de corrélation (R) de ces deux variables est 0,79 (Tableau 40).
- le débit de pointe a un fort impact sur le débit de fin de décrue (Figure 66): coefficient de corrélation non linéaire égal à 0.81 (Tableau 40).
- le débit de base à la fin de tarissement est sous l'impact du débit de fin de décrue (Figure 66) : le coefficient de corrélation linéaire égale 0.72 (Tableau 40). Il n'y a pas de relation corrélée entre le débit de base avant la pluie et les autres mesures.

Sur cette base, on choisit deux échelles de temps (temps de montée et temps de décrue) pour constituer trois catégories de ces 57 épisodes de pluies (Figure 67) qui

correspondent à des modes de fonctionnement différents du système. Les évènements sont discriminés ici par leur durée au lieu de leur volume (§ 6.1.5) car la durée est essentielle dans la conception du processus chimique :

- Catégorie 1 (19 épisodes): durée de la pluie (h) inférieure à 8 h (3ème quartile de temps de montée) ;
- Catégorie 2 (22 épisodes) : durée de la pluie supérieure à 8h mais inférieure à 18,5h (3ème quartile de temps de décrue) ;
- Catégorie 3 (16 épisodes) : durée de pluie supérieure à 18,5h.

Tableau 40 : Test de corrélation de Pluie – Débit du CD - Chauconin

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>M1</b>							
<b>M2</b>	0.41444						
<b>M3</b>	0.18759	0.6537					
<b>M4</b>	0.22857	0.78511	0.51486				
<b>M5</b>	0.22607	0.44189	0.42726	0.67571			
<b>M6</b>	0.17964	0.3255	0.38041	0.33238	0.71721		
<b>M7</b>	-0.063009	0.090439	-0.021381	0.36208	0.47486	0.42082	
<b>Linéaire (PEARSON)</b>							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>M1</b>							
<b>M2</b>	0.42106						
<b>M3</b>	-0.19682	0.41685					
<b>M4</b>	-0.23647	0.75889	-0.050205				
<b>M5</b>	0.23043	-0.43234	0.15367	0.66342			
<b>M6</b>	-0.05309	0.32773	0.13375	-0.50124	0.68443		
<b>M7</b>	-0.11713	-0.17412	-0.26202	0.31218	0.037048	0.30869	
<b>Linéaire partielle</b>							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>M1</b>							
<b>M2</b>	0.47341						
<b>M3</b>	0.037262	0.61447					
<b>M4</b>	0.27487	0.653	0.51656				
<b>M5</b>	0.28858	0.52511	0.40112	0.80985			
<b>M6</b>	0.25346	0.46022	0.37132	0.60346	0.76906		
<b>M7</b>	0.060909	-0.084285	0.0032684	0.43034	0.51687	0.3791	
<b>Spearman</b>							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
<b>M1</b>							
<b>M2</b>	0.32457						
<b>M3</b>	0.019627	0.46305					
<b>M4</b>	0.19272	0.49621	0.3769				
<b>M5</b>	0.20545	0.37285	0.29476	0.64012			
<b>M6</b>	0.19188	0.3321	0.2827	0.45595	0.61949		
<b>M7</b>	0.044618	-0.060723	0.013664	0.291	0.38028	0.28788	
<b>Kendall</b>							

NB: M1 – Durée de pluie en h; M2- somme de pluie en mm; M3- pic intensité de pluie mm/h; M4- Pic débit du CD en l/s; M5- Débit de seuil du tarissement en l/s; M6- Débit de base de la fin du tarissement en l/s; M7- Débit de base avant montée en l/s

En poursuivant la logique précédente, les 57 hydrogrammes sont répartis en quatre catégories (Figure 68) :

- Catégorie 1 : hydrogramme dissymétrique de remontée rapide et décrue lent sans tarissement. Le temps de montée est inférieur à 8h et le temps de décrue est inférieur à 18,5 h (34 épisodes).

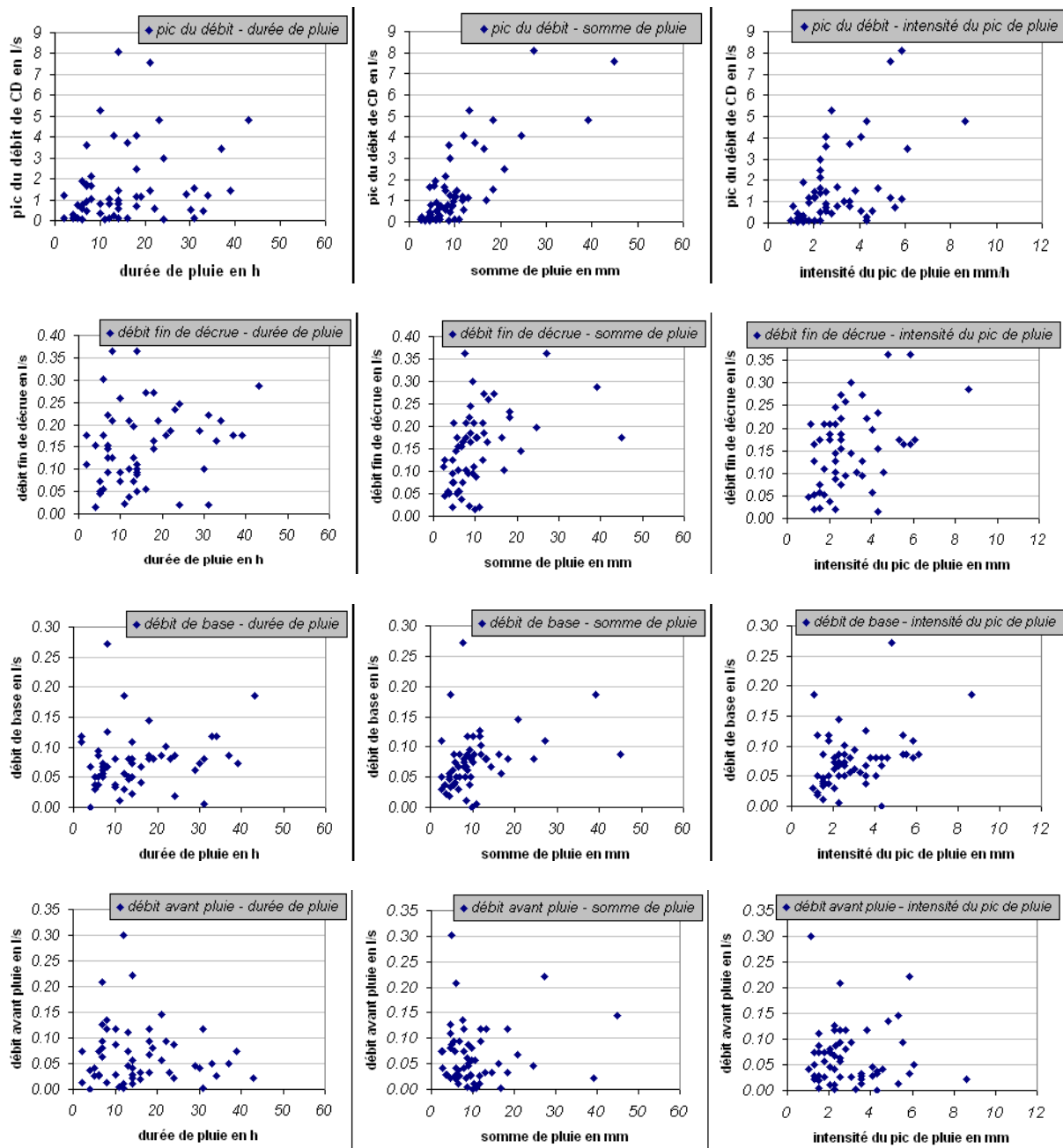


Figure 65 : débit de pic/décruce/base/avant pluie en fonction de pluie (durée/somme/intensité du pic)

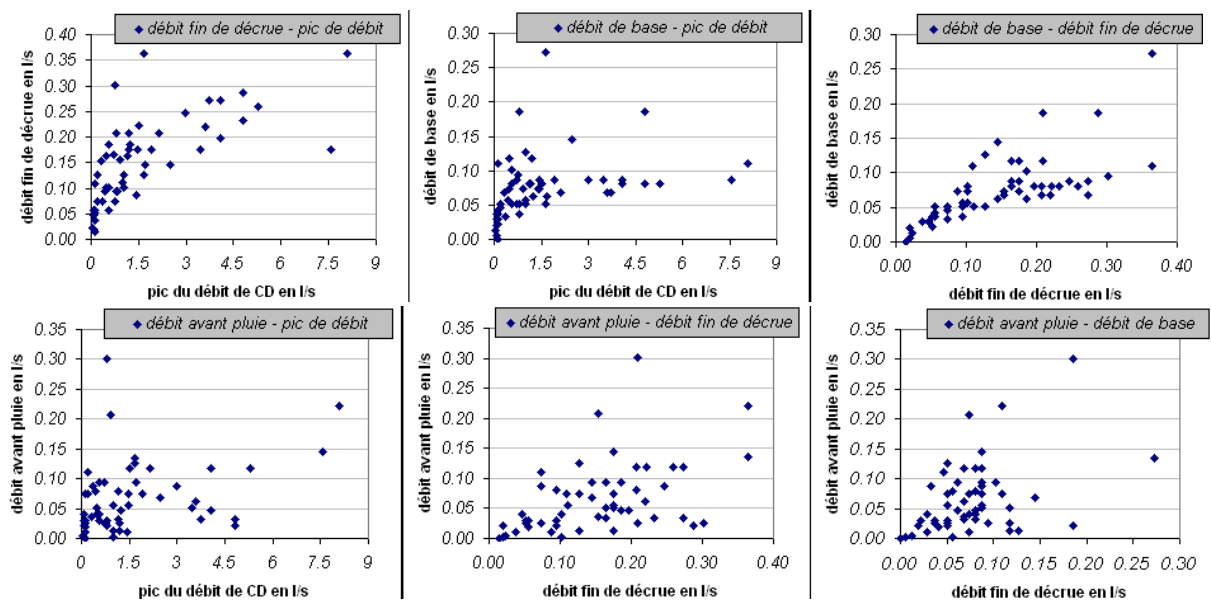


Figure 66 : débit de décroue/base/avant pluie en fonction de débit pic/décroue/base

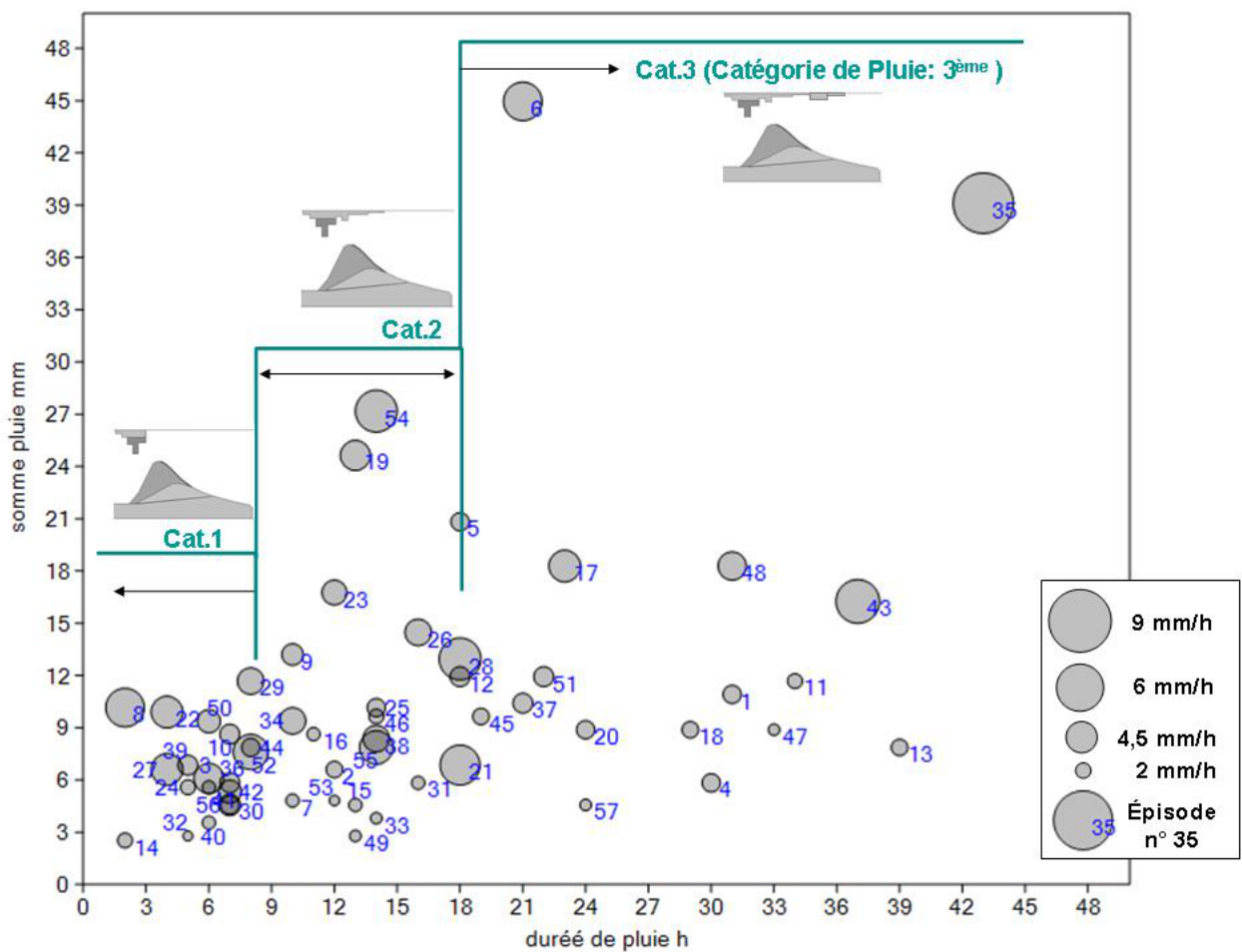


Figure 67 : Caractéristiques des Pluies – 3 catégories découpées en fonction de la durée de pluie

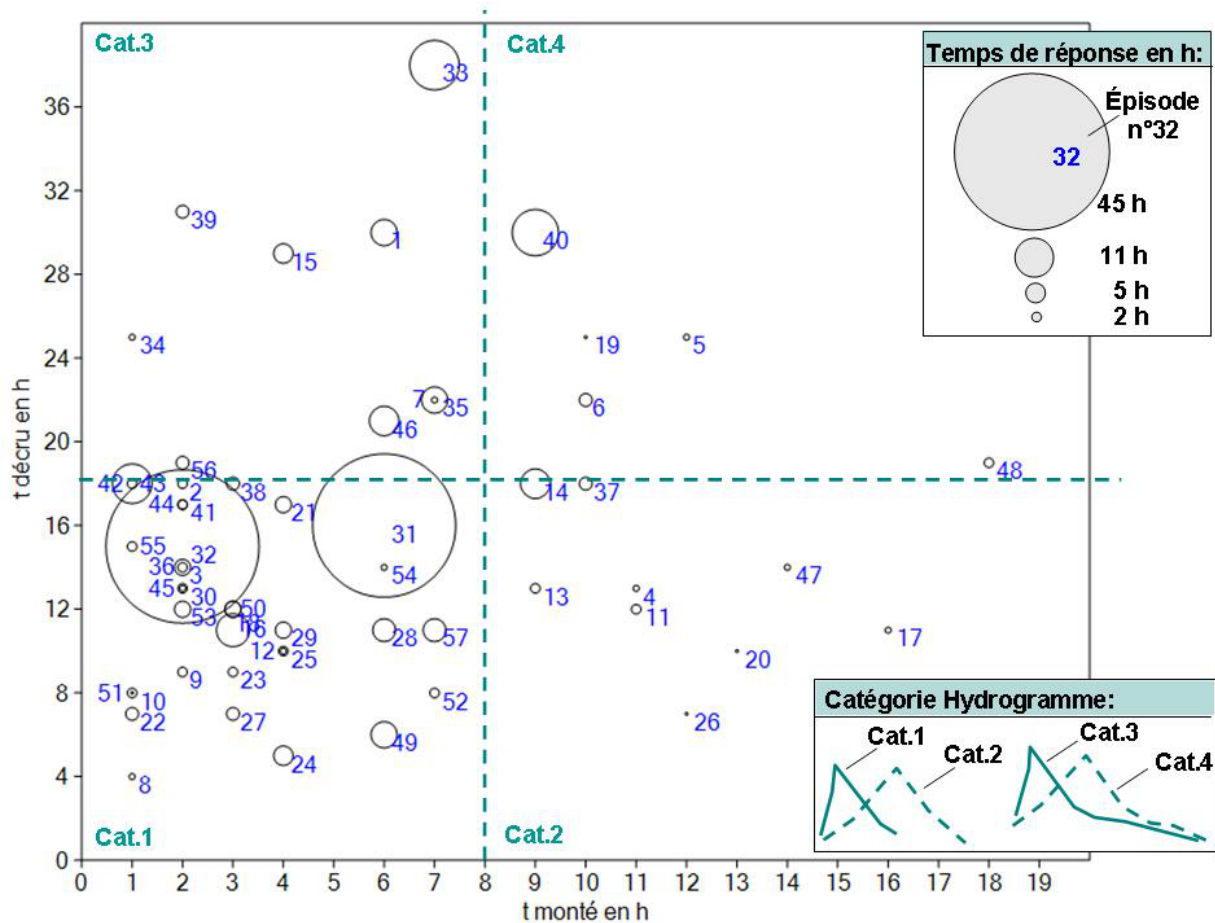


Figure 68 : Caractéristiques des hydrogrammes du CD – 4 catégories distinguées en fonction de fin de décrue (18,5 h) et de temps de montée (8h)

- Catégorie 2 : hydrogramme symétrique de remontée lent et décrue lent sans tarissement. Le temps de montée est entre 8 et 19 h. Le temps de décrue est toujours inférieur à 18,5 h (9 épisodes).
- Catégorie 3 : hydrogramme dissymétrique de catégorie 1 mais avec le tarissement. Le temps de montée est inférieur à 8h, et le temps de décrue est plus long que 18,5 h (9 épisodes).
- Catégorie 4 : hydrogramme symétrique de catégorie 2 mais avec le tarissement. Le temps de montée est entre le 8 et 19 h, et le temps de décrue est supérieur à 18,5 h (5 épisodes).

La Figure 68 présente les 57 épisodes dans les 4 catégories ainsi que la durée du temps de réponse de chaque épisode. Sur la base de cette catégorisation. Seule la catégorie 1 présente des épisodes de temps de réponse supérieur à 24 heures (2 épisodes, 42 et 45 heures). Tous les autres temps de réponses sont inférieurs à 11

heures. La majorité est inférieure à 5h ce qui correspond au temps (4,2 h) mis par une goutte d'eau pour traverser la couche de matériaux drainant ( $10^{-4}$  m/s) de 1,5 m.

En combinant les deux catégorisations de la pluie et du débit, il est possible de dresser le tableau croisé correspondant (Tableau 41).

Les pluies de catégorie 1 et 2 (72% de pluie totale) produisent essentiellement des hydrogrammes de catégorie 1. C'est-à-dire des hydrogrammes typiques de l'écoulement rapide de la surface.

**Tableau 41 : Répartition de la pluie dans chaque catégorie de hydrogramme du CD**

N° épisodes		N° hydrogramme lié au catégorie de pluie			
		cat.1	cat.2	cat.3	cat.4
<i>Totale</i>	57	cat.1	cat.2	cat.3	cat.4
<i>cat.1</i>	19	15	1	2	1
<i>% totale</i>	33%	79%	5%	11%	5%
<i>cat.2</i>	22	14	1	5	2
<i>% totale</i>	39%	64%	5%	23%	9%
<i>cat.3</i>	16	5	7	2	2
<i>% totale</i>	28%	31%	44%	13%	13%

Les pluies de catégorie 3 produisent aussi essentiellement (75% de cas) un hydrogramme à décrue sans tarissement (catégorie 1-31%- et 2 – 44%-). Dans les hydrogrammes de catégorie 2, le temps de montée est au moins 2 fois plus long que le temps mis par l'eau pour traverser la colonne de matériaux drainant de 1,5 m de hauteur. Ce temps de montée long est supposé être lié à l'inhomogénéité du terrain car pour deux pluies de mêmes caractéristiques (durée, somme, intensité), deux hydrogrammes avec temps de montée ( $t_m$ ) différents sont produits. Par exemple, les différents  $t_m$  sont constatés pour des couples d'épisodes de même caractéristiques : n°34- n°26 ( $t_m$  : 1 h vs. 12h), n°45- n°20 ( $t_m$  : 2 h vs. 13h), n°51- n°37 ( $t_m$  : 1 h vs. 10h).

Environ 25% des pluies contribuent à produire un hydrogramme avec une courbe de tarissement (hydrogramme de catégorie 3 et 4). Ces 25% de pluies sont de longue durée (17 h en moyenne), de grande hauteur d'eau (15 mm en moyenne) et d'intensité horaire dépassant 1,27 mm/h.

## 2.4) Estimation des trois fractions d'écoulements

Sur la base des analyses statistiques des débits (Tableau 38) on définit le débit de seuil de tarissement à 0,21 l/s et le débit de base à 0,09l/s, on intègre les trois différentes portions de l'écoulement sur l'hydrogramme du CD (Figure 64) pour l'ensemble de données valables. Ces deux valeurs sont celles de leur troisième quantile selon l'explication décrit à côté de Tableau 38. Selon ces principes, on intègre chaque fraction de débit sur l'hydrogramme (données du 17/06/2014 18 h au 31/05/2016 23 h) afin d'obtenir les résultats suivants:

- le débit de base (inférieur de 0,09 l/s, Figure 64) représente 23% du volume d'eau écoulé dans le CD pour toute la durée de l'acquisition validée ;

- l'écoulement inférieur au seuil de tarissement (infiltration lente de sub-surface de plateforme < 0,21 l/s mais supérieure à 0,09 l/s, Figure 64) est de 13% du volume d'eau écoulé dans le CD ;

- donc, l'écoulement de décrue rapide (débit de montée plus débit de décrue supérieur à 0,21 l/s, Figure 64) représente 64% du volume d'eau écoulé dans le CD pour toute la durée de l'acquisition validée.

En résumé, nous avons observé le pic de l'hydrogramme en sortie du collecteur drainant de 1 heure jusqu'à 45 heures après le pic d'intensité de l'évènement pluvieux. Ce temps de réponse varie selon les caractéristiques de la pluie, les conditions initiales du sol avant la pluie et la répartition des flux d'eau selon les deux chemins de routage (écoulement rapide de surface représentant 64% de volume totale et écoulement lente de sub-surface interne de la plateforme en plus le débit de base représentant 36% de volume total).

50% des temps de réponses sont inférieurs à 2h. Ces faibles valeurs, sont observées lorsque des évènements pluvieux se succèdent de manière rapprochée. Nous appellerons ce premier passage d'eau « flux rapide ». Un second écoulement se produit de manière décalée, de 6 heures à 1,5 jours après le début de la pluie selon la condition de la pluie et la condition initiale du terrain avant la pluie. Lorsque des évènements pluvieux se succèdent de manière rapprochée ce temps de réponse est en moyenne de 15 heures. Nous appellerons ce deuxième passage d'eau « flux lent ».

## 3.) Analyse de l'évolution chimique de l'eau

L'observation de l'écoulement rapide - lent a été faite par une séparation de l'hydrogramme avec la méthode de la pente constante (Caissie et al., 2002; Torres et al., 2011) présentée dans le chapitre 6 (§6.1.7). Ici, cette séparation de l'hydrogramme peut aussi être faite par les différentes arrivées d'eau du point de vue



chimique : le pH et la conductivité (C25) de l'eau du CD\_ instrumenté sont retenus pour les deux indicateurs de séparation.

Il a également été observé au chapitre 6 (§ 6.1.12) une évolution de la chimie de l'eau (pH et conductivité) du collecteur drainant en relation avec les changements du débit lui-même dépendant des évènements pluvieux. Lors d'un évènement pluvieux, le pH décroît. Il atteint sa valeur minimale (autour de pH 8) en moins de 11 heures (75% cas de pluies valables, Tableau 42) après le début de sa diminution. Ensuite, le pH remonte et atteint sa valeur maximale (autour de pH 11) de 4h à 1,9 jours ( pour 75% cas de pluies valables, Tableau 42) après le minimum de pH 8. Si le cumul de pluie de l'évènement est inférieur à 15 mm, la durée de remontée est inférieure à 22 heures. Pour les évènements plus importants, elle peut atteindre 4,5j.

La conductivité, elle, diminue également sur une durée de 1 à 8 heures puis réaugmente sur une durée de 8h à 3,3j (pour 75% cas de pluies valables, Tableau 42). Si le cumul de pluie de l'évènement est inférieur à 15 mm, la durée de remontée est inférieure à 40 heures. Pour les évènements plus importants, elle peut atteindre 6,3j.

Tableau 42 : Statistiques de caractéristiques temporelles de la chimie d'eau du CD – Chauconin

Statistiques	$\Delta h$ entre pH_chute et débit_montée	durée de pH_chute en h	temps du pH remontée en h	$\Delta h$ entre C25_chute et débit_montée	durée de C25_chute en h	temps du C25 remontée en h
Nombre d'échantillons	57	57	57	57	57	57
Valeur_min	-3.0	1.0	4.0	-5.0	1.0	8.0
Valeur_max	10.0	39.0	111.0	6.0	21.0	150.0
Valeur_moyenne	-0.2	7.0	38.0	-0.6	5.9	60.9
Erreur standard	0.2	0.9	3.1	0.2	0.6	4.4
Variance	3.3	42.0	520.0	2.3	22.0	1111.0
Déviat ion standard	1.8	6.5	22.8	1.5	4.7	33.3
Médian	0.0	5.0	31.5	0.0	5.0	53.0
25 percentile	-1.0	2.0	22.0	-1.0	2.0	35.5
75 percentile	0.0	11.0	45.5	0.0	8.0	78.5

Les échelles de temps des variations, de la chimie de l'eau (pH et C25) dans le CD en réponse à l'évènement pluvieux sont cohérentes avec les échelles de temps des variations de débit. En fait, la dynamique chimique apparaît fortement dépendante de la dynamique des processus physiques : le temps de décalage entre le début de la variation de chimie (pH et C25) et le début de la variation de débit est de 0h pour 75% de cas de pluies valables (colonne 2 et 5 dans le Tableau 42).

Les résultats d'une analyse de corrélation (R : linéaire et non linéaire, Tableau 43) parmi divers temps en incluant la durée de la pluie (M1), les quatre temps caractéristiques d'un hydrogramme (temps de réponse- M8, de montée- M9, de décrue- M10 et de base- M11) et différents temps de l'évolution de la chimie d'eau : durée de chute (M13) et remontée (M14) du pH, durée de chute (M16) et remontée



(M17) de la conductivité C25, décalage d'heure entre le début de l'évolution de la chimie et le début de l'évolution du débit ( $\Delta\text{pH}$  - débit : M12,  $\Delta\text{C25}$ - débit :M15), sont donnés dans le Tableau 43.

D'après les résultats du Tableau 43, on obtient que :

- La chute de pH (M13) et la chute (M16) de conductivité (C25) sont liées à la montée (M9) de débit dans le CD, le coefficient de corrélation (R) est respectivement 0,8 et 0,76 ;
- La remontée (M14) de pH est liée au tarissement du débit de base (M11), le coefficient de corrélation (R) est 0,71.

Pour valider ces deux observations de corrélation entre la chimie et le débit, on exploite le graphique (nuage de points) entre ces cinq mesures (M9, M11, M13, M14, M16, Tableau 43) deux par deux dans la Figure 69: M13 - M9, M16 - M9, M14- M11. Les premiers deux couples montrent une tendance linéaire et le dernier illustre une répartition non linéaire.

En couplant les résultats du Tableau 42 et du Tableau 43, on obtient que :

- Le pH et la conductivité (C25) chutent dès que le débit du CD commence à monter dans 75% de cas (42 épisodes) et dans les 25% des cas extrêmes restant, ces décalages peuvent varier entre -3 h et 10 h pour le pH et, entre -5h et 6h pour la C25 vis-à-vis du débit (Tableau 42). Le décalage de temps négatif est dû à la formation de calcite qui produit une diminution de pH et de C25 avant l'augmentation de débit dans le CD.
- Le pH et la C25 remontent et stabilisent pendant la période de décrue (cas du pH) et la période de retour au débit de base (cas de C25).

En résumé, les estimations des temps caractéristiques des écoulements rapide et lent selon ces trois méthodes sont synthétisées dans le Tableau 44.

Tableau 43 : Test de corrélation de Pluie – Débit – Chimie du CD – Chauconin

	M1	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
M1											
M8	-0.17181										
M9	0.50747	-0.087818									
M10	0.09007	0.15764	0.13828								
M11	0.26227	0.28716	0.14789	0.7582							
M12	-0.0063933	0.2021	0.037619	0.14471	0.17129						
M13	0.5472	-0.13126	0.64242	0.1028	0.19839	-0.23805					
M14	0.13351	0.066155	0.070272	0.27309	0.58281	-0.17959	0.18156				
M15	0.053981	0.090205	0.086645	0.029059	0.050345	0.82832	-0.15307	-0.35662			
M16	0.45447	-0.049093	0.80037	0.078965	0.070675	-0.14511	0.70684	0.19715	-0.04184		
M17	0.21297	0.036627	-0.040756	0.19108	0.40818	-0.16736	0.017076	0.62162	-0.11829	0.13096	

**Corrélation Linéaire (R)**

	M1	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
M1											
M8	-0.24567										
M9	0.51351	-0.06869									
M10	0.12316	0.2219	0.14895								
M11	0.23367	0.19971	0.11426	0.78025							
M12	-0.19168	0.41251	0.18013	-0.065558	-0.14589						
M13	0.57976	-0.27046	0.58047	0.27792	0.32405	-0.24409					
M14	0.33166	-0.027801	0.10772	0.4188	0.7146	-0.39896	0.33695				
M15	-0.095627	0.22567	0.19512	-0.063501	-0.20665	0.73812	-0.11162	-0.5207			
M16	0.51481	-0.16892	0.75991	0.15865	0.15762	-0.027998	0.66202	0.27281	0.079467		
M17	0.22413	0.13338	0.017569	0.27114	0.51405	-0.26653	0.15885	0.66165	-0.19738	0.12753	

**Corrélation non Linéaire (R)**

NB:

M1 – durée de pluie en h;  
M8- temps de réponse en h;  
M9- temps de montée en h;  
M10- temps de décrue en h;  
M11- temps de base en h;

M12- décalage d'heure du pH<sub>chute</sub> et débit<sub>montée</sub>;  
M13- durée de pH chute en h;  
M14- temps du pH stabilisé après pluie en h;  
M15- décalage d'heure de C25<sub>chute</sub> et débit<sub>montée</sub>;  
M16- durée de C25 chute en h;  
M17- temps de C25 staliilisé après pluie en h

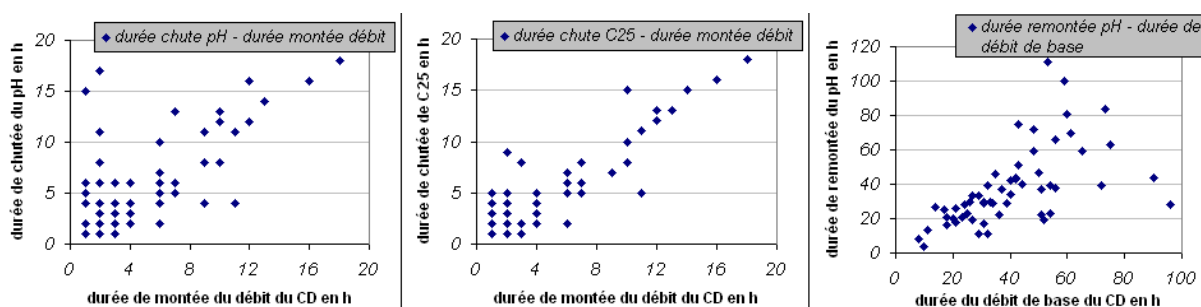


Figure 69 : Corrélation entre les temps de l'évolution de la chimie et les temps de l'évolution du débit

On constate une cohérence entre les temps de réponses estimés sur la base de la perméabilité théorique des matériaux drainant, ceux observés dans les relations pluie - débit et ceux estimés sur la base de l'évolution physico-chimique de l'eau du CD. Toutefois les valeurs théoriques de la perméabilité sur plate forme neuve amènent à des temps de réaction du système beaucoup trop longs par rapport aux observations.

Tableau 44 : estimation du temps de séjour de flux rapide et lent dans le sous-système bassin versant - Chauconin

Flux	Ts (h ou j)						
	Ts Via Perméabilité			Ts Via hydrogramme	Ts Via courbe- pH		Ts Via courbe- C25
Rapide	Matériaux drainants	$10^{-4}$ m.s-1	4,2 h	1 à 5h	1 à 5h		
Lent	Plateforme	Nouvelle $10^{-7}$ m.s-1	32,4 j	8h à 4,5j	Hauteur de pluie par jour	4h à 22h (< 15 mm)	8h à 6 j
		Dégradée $10^{-6}$ m.s-1	3,2 j			22 h à 4,5 j (> 15 mm)	
NB : Ts- temps de séjours en heure (h) ou jour(j) ; C25- conductivité électrique à 25°C							

La perméabilité réelle de la sous - couche est beaucoup plus élevée que la valeur théorique au moins d'un facteur 10. Il n'est pas possible de statuer sur l'origine de cette différence, qui peut être liée à une usure de la plateforme ou à une réalisation sur la voie de service à des conditions moins élevées.

Dans un objectif de modélisation, compte tenu des échelles de temps caractéristiques qui viennent d'être mises en évidence, il faudra utiliser des outils fonctionnant au moins à l'échelle horaire, voire moins.

### 8.3 Analyse du fonctionnement physico-chimique du système

#### 8.3.1 Un système à l'air libre

La pression atmosphérique est mesurée en continu à l'intérieur et l'extérieur du CD sur le site par deux capteurs de pression de fournisseurs différents. Elle est exprimée en atmosphère (atm.). La Figure 70 présente une représentation des chroniques de la pression de l'air interne-externe au CD de juillet 2015 à septembre 2017. Les différences des deux mesures et les résultats obtenus sont présentés sous la forme de boîtes à moustaches.

La pression observée dans le collecteur drainant est bien corrélée à celle mesurée en plein air. Par contre, elle est systématiquement inférieure. Il n'y a pas de dérive liée au capteur : l'écart est constant. En particulier sa valeur médiane vaut 0,997 comparée à celle de l'autre capteur (1,002) pendant la première période de données synchrones, 0,994 vs. 1,007 en médiane pour la période synchrone 2. On attribue cela à un effet de capteur lié aux différentes origines de fabrication.

### 8.3.2 Un système partiellement fermé vis-à-vis du CO<sub>2</sub> à petite échelle de temps

La Figure 71 synthétise les mesures synchronisées de la pCO<sub>2\_dissout</sub> dans l'eau du CD et dans l'air du CD en comparant avec la pCO<sub>2</sub> dans l'atmosphère du juin 2014 au mai 2016. La pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) atmosphérique a augmenté de 390 à 410 ppm (3,9 à 4,1 \* 10<sup>-4</sup> atm) entre 2013 et 2016 (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>). Au cours de l'année, elle oscille de quelques dizaines de ppm entre des valeurs hautes au printemps et des valeurs basses en automne. Au cours de la journée, elle peut osciller de quelques ppm (2 à 5) entre la nuit (valeurs hautes) et la journée (valeurs basses).

Le Tableau 45 présente un résumé statistique des mesures synchronisées de la pCO<sub>2\_dissout</sub>, la pCO<sub>2</sub> dans l'air du CD et celle dans l'atmosphère. La pCO<sub>2</sub> atmosphérique estimée par la mesure de la pression atmosphérique (0,97 à 1,03 atm) fois une fraction constante (0,04%) de CO<sub>2</sub>, est proche de celle trouvée sur le site de MAUNA LOA. La valeur dans l'ensemble de mesure varie entre 388 et 412 ppm.

Au niveau du regard S9, la pCO<sub>2</sub> dans l'air intérieur du CD varie entre 346 à 879 ppm sur l'ensemble de la période (Tableau 45). En considérant l'incertitude de mesure de 3%, la variation à considérer couvre l'intervalle [336 – 905] ppm. Dans 75% des cas, elle est supérieure à la pCO<sub>2</sub> atmosphérique (400 ppm, voir aussi Figure 71). La plupart de temps, le CD est un système qui ne s'équilibre donc pas instantanément avec l'atmosphère. Des processus locaux modifiant les concentrations en CO<sub>2</sub> dans le collecteur drainant (CD) se produisent donc. La dynamique de ces processus se produit à des échelles de temps plus courtes que la mise en équilibre avec l'air extérieur, qui, par ailleurs, se produit naturellement, car le système du CD n'est pas étanche, en particulier en raison de la présence des fentes dans le CD.

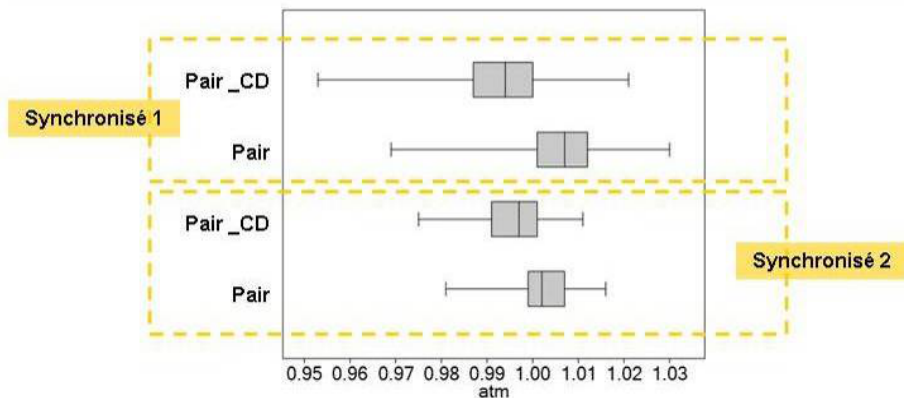
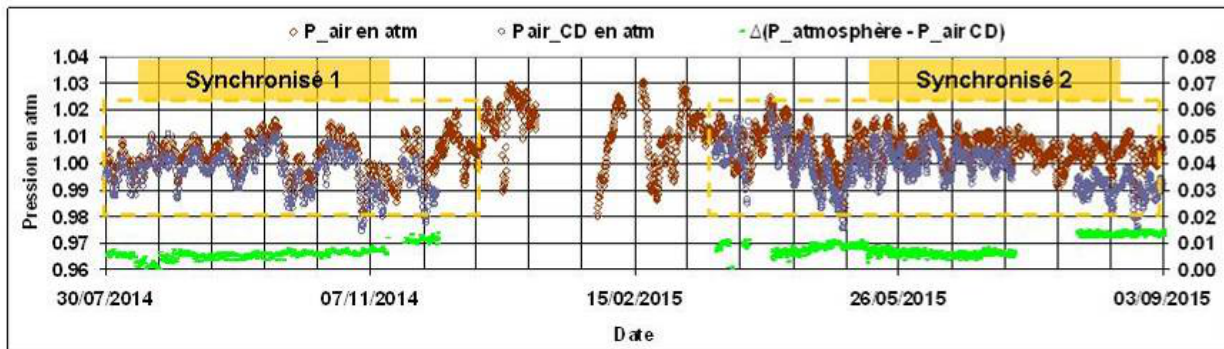


Figure 70 : Synthèse et comparaison de la pression de l'air interne et externe du CD

La  $p\text{CO}_2_{\text{dissout}}$  dans l'eau du CD couvre une gamme de 7 à 880 ppm en valeur absolue. En considérant 3% d'incertitude (égale  $\pm 30$  ppm), cette gamme peut s'élargir à 0 ~ 910 ppm. La  $p\text{CO}_2_{\text{dissout}}$  est inférieure à la  $p\text{CO}_2$  dans l'air du CD la plupart de temps (>75% de cas), mais peut aussi être à l'équilibre avec, ou supérieure (Figure 71, zoom 1 et 2).

Toutefois la durée des épisodes pendant lesquels la  $p\text{CO}_2$  dans le collecteur drainant (CD) est significativement supérieure à la concentration en  $\text{CO}_2$  atmosphérique ne dépasse pas 3 jours (zoom 1, Figure 71). La Figure 71 (zooms 1 et 2) présente les évolutions de  $\text{CO}_2$  dans le CD au cours de l'un de ces épisodes. En résumé, le CD peut être considéré comme un système fermé à la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique, à l'échelle de temps d'un épisode de pluie journalière.

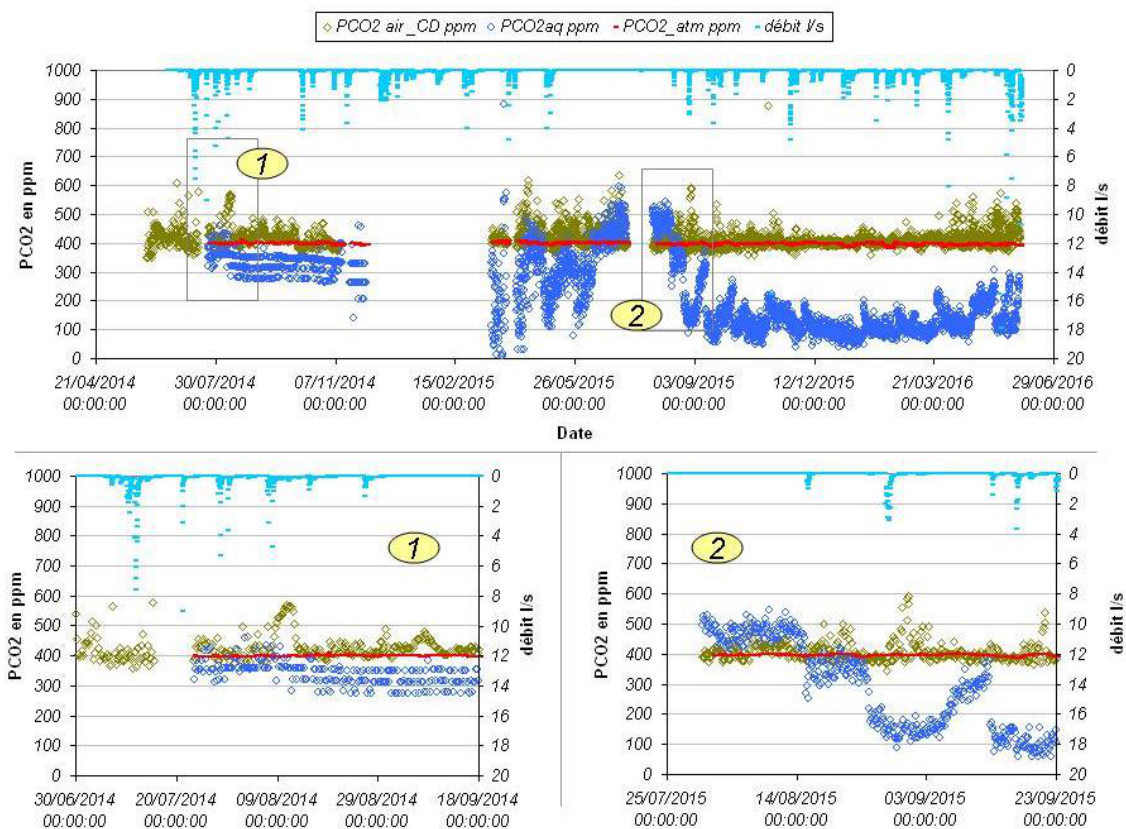


Figure 71 : Synthèse et comparaison des données de pression partielle de CO2 de l'air et CO2 dissout dans l'eau du CD

Tableau 45 : Statistique de la pCO2 dans l'air et l'eau du CD- Chauconin

Statistiques	pCO <sub>2</sub> air_CD en ppm	pCO <sub>2</sub> _dissout-CD en ppm	pCO <sub>2</sub> _atm en ppm
Nombre d'échantillons	3914	3775	3789
Valeur_min	346	7	381
Valeur_max	879	880	411
Valeur_moyenne	416	214	397
Erreur standard	0.5	2.0	0.1
Variance	997	15416	15
Déviatoin standard	32	124	4
Médian	408	166	398
25 percentile	398	109	395
75 percentile	425	318	400

### 8.3.3 La température de l'eau du CD et de son environnement

D'après l'analyse du transfert de l'eau dans le sol (§ 8.1), l'eau du collecteur drainant (CD) est un mélange d'eau de ruissellement et d'eau ayant circulé dans les différentes couches constituant la plateforme ferroviaire. La température de l'eau du CD est impactée par ces différentes origines d'eaux. De plus des échanges thermiques avec l'extérieur peuvent être envisagés, en particulier lorsque la température de l'atmosphère est inférieure à la température de l'air du CD.

La Figure 72a est une représentation par des boîtes à moustaches des températures de l'eau du CD et des autres températures mesurées sur le site pendant les 2 ans d'acquisition. On voit que :

- La température de l'eau varie entre 6°C et 18°C dans l'année. Dans 50% de temps dans l'année, l'eau est à moins de 12°C. Cette variation est cohérente avec celle, interne, de la plateforme (P1 et P2, à 3 m de profondeur) qui varie de 7°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) à 18°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Dans 50% de la durée d'observation, la température interne de la plateforme est aussi inférieure à 12°C.
- La température de l'eau dans le piézomètre P5 (nappe du CSO) reste constante dans l'année avec une valeur de 12 °C ( $\pm 0,6^\circ\text{C}$ ). La température des sols, quant à elle, dans les piézomètres (P3 et P4) reste, très stable, de 12°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ). La cohérence de ces trois mesures souligne que le sol de la plateforme permet de maintenir la température aux alentours de 12°C.
- La température de l'atmosphère varie de -5°C à 30°C. Dans 50% du temps, la température atmosphérique est inférieure à 10°C. D'après ces analyses fines, on confirme que les valeurs extrêmes de température de l'eau du CD : 6°C (valeur minimale) et 18°C (valeur maximale) sont liées aux variations des températures extérieures de l'air. La valeur médiane de 12°C dans le CD est largement liée aux caractéristiques locales du sol.

La Figure 72b présente une chronique des différentes données de température enregistrées sur le site de Chauconin (mai - juillet 2014). D'après la figure, on observe que :

- La pile de la centrale d'acquisition ne chauffe pas l'air dans le regard en service. Pendant un mois (15 juin au 15 juillet 2014), la température de l'air du collecteur drainant (CD) et la température à la surface de la centrale d'alimentation du centrale d'acquisition située dans le regard S9 du CD ont été mesurées afin d'évaluer la possible influence de la source d'alimentation électrique sur la température de l'air. Les données sont présentées dans la Figure 72. La température à la surface de la centrale d'alimentation est systématiquement inférieure à celle de l'air dans le CD. La centrale



d'acquisition ne constitue donc pas une source de chaleur au sein du système installé en S9 ;

- La température de l'air quand elle dépasse significativement les 12 degrés contribue à l'augmentation de la température dans l'air du CD ;
- La température de l'eau du CD est corrélée à la température de l'atmosphère du CD et à celle du sol (12°C). Elle varie moins brutalement que celle dans l'air du regard.

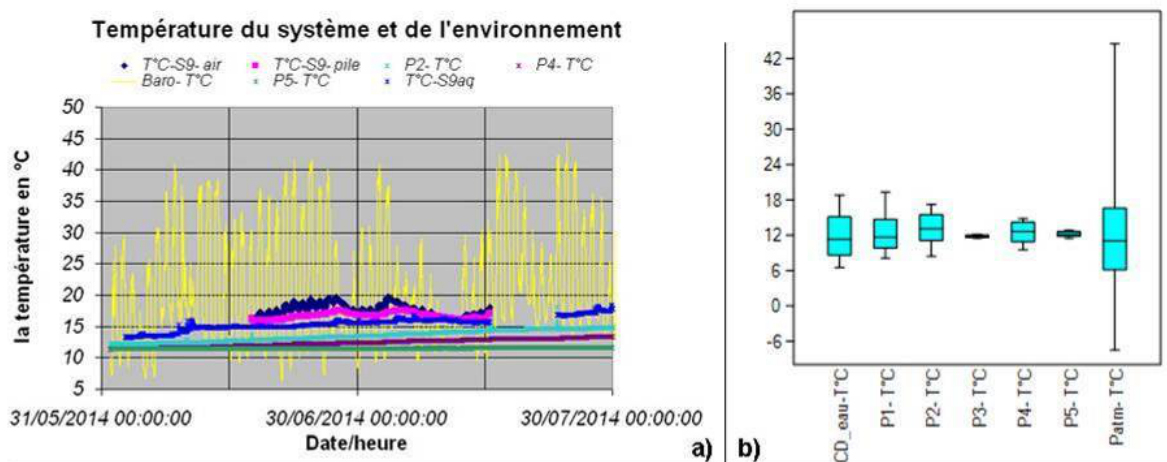


Figure 72 : Synthèse et comparaison de température interne et externe du CD

NB : a) Extrait des données synchrones b) Boîte à moustaches des mesures de la température dans différents endroits du système : P1/P2 (plateforme), P3 (CSO), P4 (limons), P5 (nappe de CSO), Atmosphère, température de l'air (S9-air) et de l'eau (S9aq) interne du CD, de la station d'alimentation située dans le regard (S9-pile).

Pour quantifier l'impact de la température de l'air et de la plateforme, on effectue une corrélation multilinéaire (Package « congress de multivariable ») (R value = 0.721) qui indique que pour une augmentation de 1°C dans l'eau du CD, la température de l'air interne du CD qui est en contact direct avec l'eau du CD doit augmenter 0,06°C et la température de sous système bassin versant doit augmenter 0,9 °C.

## 8.4 Pré analyses servant à construire un modèle conceptuel.

### 8.4.1 Définition d'un épisode pluvieux avec intégration de l'hydrochimie du CD

Sur la base des descriptions et de l'analyse précédentes de l'hydrodynamique et de l'hydrochimie de l'eau du CD, nous proposons une analyse des processus selon



les catégories d'hydrogrammes et des pluies associées établies au § 8.2. Nous nous baserons sur l'épisode d'une durée d'un mois couvrant la période du 09 juin au 15 juillet 2014 (Figure 73) et un autre scénario d'une durée d'un mois couvrant la période du 17/02/2015 au 27/03/2015 (Figure 74), déjà présenté dans le chapitre 6.

Ces deux périodes d'acquisition sans rupture (une estivale, une hivernale) ont été choisies parce qu'elles couvrent les trois modes d'évolution chimiques mis en évidence dans l'eau du CD vis-à-vis des trois conditions pluviométriques qui nous intéressent : pour une pluie isolée, épisodes de pluie successifs, sans pluie. De plus, ces deux périodes couvrent aussi tous les types de pluie présentant une grande gamme de cumul journalier compris entre 3 et 45 mm en alternance avec des périodes de temps sec pouvant atteindre trois semaines.

D'après l'analyse pluie-débit (§ 8.2), tous les épisodes pluvieux inférieurs à 1.4 mm sur 24 heures n'engendrent pas d'écoulement ni, par conséquent, d'évolution physico-chimique du système et nous ne les prendrons pas en compte.

Nous proposons de nommer les épisodes en fonction de leurs conséquences sur le fonctionnement du système. Ces « épisodes efficaces » concernent des événements pluvieux produisant deux conséquences (Figure 73):

- Dans un premier temps T1 (durée inférieure à 8 heures) une chute de la conductivité de l'eau du CD de plus de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et une chute du pH de plus de 1,5 unité sont observées ;
- Dans un second temps T2 (durée de 1 à 2 jours) la conductivité augmente et dépasse 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et le pH s'élève jusqu'à atteindre une valeur de  $\text{pH}11 \pm 0,5\text{pH}$  ;
- Si aucun épisode pluvieux ne se produit, la conductivité baisse légèrement (variation inférieure  $\pm 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) (temps T3 de 3 à une dizaine de jours). Pendant cette période, le temps sec se poursuit (sans écoulement), la conductivité reste stable, voire remonte légèrement vers la fin, et le pH poursuit sa décroissance jusqu'à se stabiliser autour de  $\text{pH}8 \pm 0,25\text{pH}$  ;
- Une séquence comprenant les trois temps T1, T2, T3 est appelée « Episode Efficace Individuel » (épisode EEI : T1 à T3, Figure 73a et c) ;
- Si un nouvel épisode pluvieux se produit en fin de T2, et provoque une évolution de type T1, la succession des alternances de T1 et T2 définit un « Episode Efficace en Série - EES » (Figure 73b).

En résumé, en période estivale (Figure 73, du 09/06/2014 02 : 00 au 15/07/2014 15 : 00), on observe un seul Episode Efficace Individuel (EEI : du 28/07/2014 02 :00

au 28/07/2014 12 :00). Durant les T3, on observe toutefois des évolutions de pH diminuant de 3 unités et alors que la C25 remonte certaines de  $\mu\text{S}/\text{cm}$  vers la fin de période.

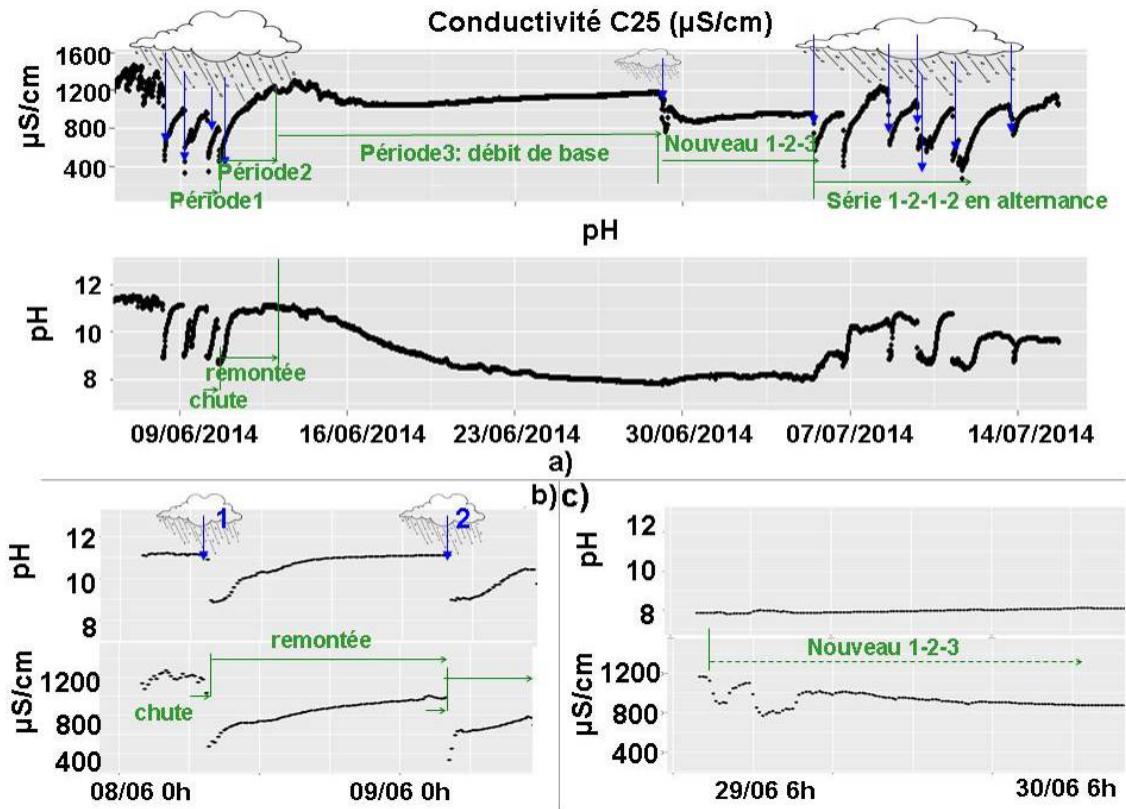


Figure 73 : L'hydrochimie et l'hydrodynamique du CD d'un épisode effectien été

NB : enbleu : évènement de la pluie ; envert : découpage de « Période » basé sur plusieurs cas similaires observé pendant 2 ans ; Période 1 : < 8h ; Période 2 : 1 à 2 jours ; Période 3 : 3 à dizaines jours ; « épisode efficace » :  $\Delta\text{pH} > 1,5$  et  $\Delta\sigma > 150\mu\text{S}/\text{cm}$  ; « épisodes efficaces en série » : Période 1 et 2 en alternance ; « épisode efficace individuel » : Période 1, 2 et 3

En période hivernale (Figure 74, du 2 mars au 31 mars 2015), on observe deux Episodes Efficaces Individuels (EEI : du 01/03/2015 20 :00 au 02/03/2015 15 :00 et du 24/03/2015 16 :00 au 25/03/2015 03 :00). Durant les T3, on observe toutefois des évolutions journalières significatives ( $\Delta\text{pH} > 1,5$  ;  $\Delta\sigma > 150\mu\text{S}/\text{cm}$ ), liées à l'interaction du fonctionnement du collecteur drainant avec l'eau présente dans la sous-couche dont les fluctuations sont enregistrées dans les deux piézomètres P1 et P2.

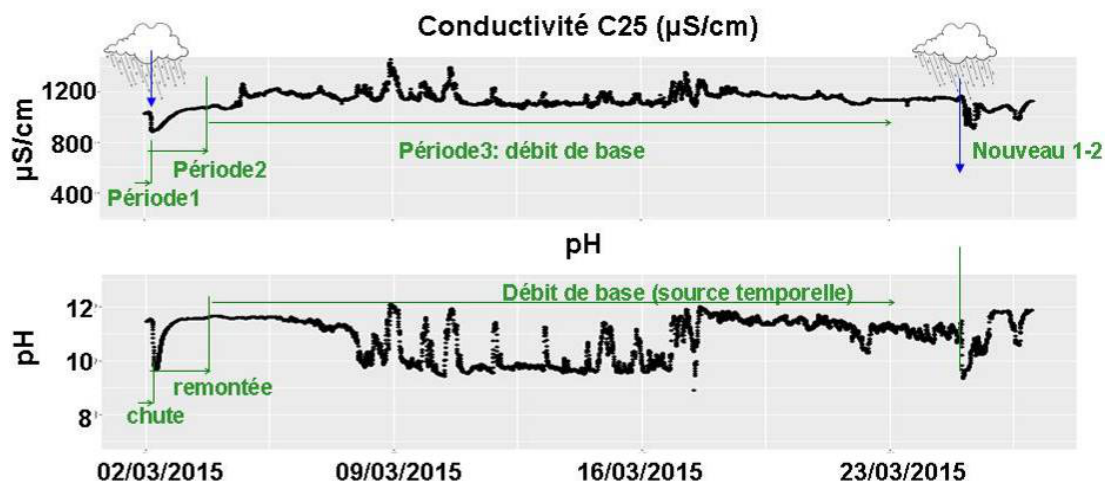


Figure 74 : L'hydrochimie et l'hydrodynamique du CD au cours d'un épisode efficace en hiver

#### 8.4.2 Processus constitutifs servant à construire le modèle

D'après les observations de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau du CD au cours des Episodes Efficaces Individuels (EEI), on observe 3 processus :

- au moment du passage du pic de pluie, la grande chute de pH et de conductivité traduit une dilution de l'eau du CD par les eaux de ruissellement (T1). Le débit dans le CD augmente rapidement, se met alors en place un écoulement rapide dans le système (Figure 74) ;
- Ensuite, pH et conductivité remontent (T2) avant de décroître doucement (début T3) tout en gardant des valeurs élevées. Parallèlement, le débit décroît vers le débit de base. Ces remontées traduisent l'arrivée d'un écoulement plus chargé ;
- En fin de T3, le débit est quasiment nul, le pH descend progressivement jusqu'à pH8 puis se stabilise ; la conductivité descend progressivement  $200 \pm 50 \mu\text{S/cm}$  et puis remonte légèrement ( $100 \pm 50 \mu\text{S/cm}$ ). Ces observations signalent la formation de la calcite au début (abaissement du pH et de C25) et puis sous effet de l'évaporation vers la fin (C25 est remontée). Le début de la précipitation est donc causé par un apport d'écoulement lent (période T2).

## 8.5 Justification et quantification du sous système physique

### 8.5.1 Un système à deux réservoirs : le modèle GR4H\_Drain

Sur la base des analyses précédentes le système physique peut être décrit comme un système à deux réservoirs, l'un produisant un écoulement rapide (horaire), l'autre un écoulement lent (journalier). Nous le modéliserons par un modèle à deux réservoirs (Figure 75) à pas de temps horaire compte tenu des échelles de temps caractéristiques du fonctionnement dynamique du système étudié qui viennent d'être mises en évidence dans le § 8.2.

IRSTEA a développé un outil de simulation d'un modèle à deux réservoirs à pas de temps horaires (GR4H) disponible sous R et sous Excel (<https://webgr.irstea.fr/modeles/journalier-gr4j-2/>), qui peut être modifié pour représenter le système de Chauconin. Les différences entre les deux représentations conceptuelles sont présentées à la Figure 75. Nous dénommerons ce modèle GR4H\_Drain (Figure 75).

On adapte ce modèle (GR4H) pour notre cas (GR4H\_Drain) par les modifications suivantes (voir Figure 75) :

- La somme ( $P_r$ ) de l'infiltration et du ruissellement de réservoir de plateforme est 100% routé dans le réservoir de matériaux drainants ;
- Le débit  $Q$  final ( $Q$ ) en sortie du modèle sera comparé au débit mesuré en sortie du CD en négligeant le routage interne le long du CD, nous restons dans une approche conceptuelle 0-dimensionnelle.

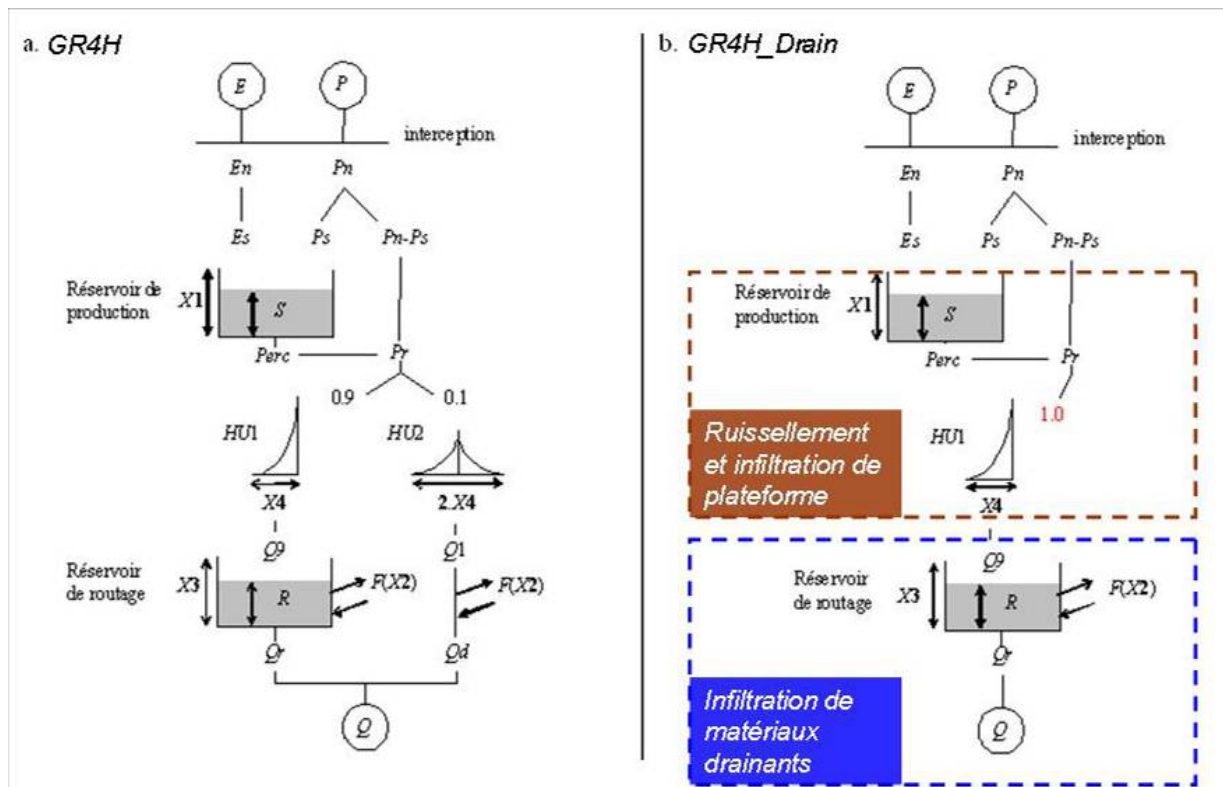


Figure 75 : Diagramme de routage dans le modèle de deux réservoirs

a) version originale du GR4H; b) version adaptation dans notre cas -GR4H\_Drain

NB : X1- capacité maximale du réservoir de production (mm) ; X2 – échange interbassin (mm) ; X3- capacité maximale du réservoir de routage (mm) ; X4- durée del' hydrogramme unitaire (jours).

## 8.5.2 Conditions limites et conditions initiales des simulations sur le site de Chauconin

### 8.5.2.1 La démarche

Dans le cadre de cette démarche de simulation de l'hydrodynamique dans le CD (GR4H\_Drain) de Chauconin, les données d'entrée nécessaires sont les suivantes :

- données d'entrée de pluie brute P (mm) (Figure 75) issues de l'acquisition in situ ;
- données d'entrée de E (mm) (Figure 75) l'évapotranspiration potentielle (ETP) : Si  $P > E$ , alors pluie nette  $P_n = P - E$  et  $E_n = 0$  ; Si  $P < E$ , alors  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P$ . N'ayant pas de mesure de cette valeur, elle sera déterminée par l'estimation de perte initiale au moyen de l'analyse pluie - débit ;
- pertes initiales estimées (E+Ps): l'évapotranspiration plus la pluie stockée (PS) dans le réservoir de la plateforme déterminé par le taux de remplissage. Pour

la simulation, on répartit les pertes de manière continue et constante tout au long de l'évènement pluvieux ;

- la condition initiale (taux de remplissage des réservoirs) est à caler dans la simulation par défaut de mesure : en période estivale, testé de 0% à 100%, en période hivernale, testé de 100% à 0% ;
- conditions limites : la surface de bassin versant ferroviaire autour du drain étudié est à estimer. On calcule la superficie du bassin versant en comparant la hauteur de pluie par la surface ( $H * S$ ) et le volume écoulé (somme de  $Q$  en fonction du temps) ;
- les précipitations nettes ruisselées (brutes – pertes) sont calculées ainsi :  $Pr = P - (E + Ps) = Pn - Ps$  ;
- la percolation du réservoir de plateforme (perc) est estimée par calage du paramètre X1 (Figure 75);
- l'ensemble de la percolation dans la plateforme (perc, Figure 75) en plus de la pluie nette ruisselée ( $Pr$ , Figure 75) sera routée dans le réservoir de matériaux drainant qui est calé par le paramètre X3 (Figure 75) ; la pluie nette ruisselée est calé par le paramètre X4 (Figure 75) ;
- conditions limites : la fraction de l'échange d'eau avec la nappe souterraine (X2 fixé à 0 car la nappe est beaucoup plus profonde que l'entrée d'eau du drain, Figure 75);
- donnée d'entrée de débit d'acquisition in situ dans le drain afin de caler le modèle.

#### 8.5.2.2 Périodes simulées – données d'entrée

Deux périodes (mensuelles) d'acquisition sans rupture pour la pluie et le débit du CD sont choisies : une estivale (du 01/07/2014 01 :00 au 31/07/2014 23 :00) et une autre hivernale (du 17/02/2014 10 :00 au 27/03/2014 10 :00). Ces deux mois ont été choisis parce qu'ils couvrent les 3 catégories de pluies identifiées et engendrent les 4 catégories d'hydrogrammes (Tableau 46).

**Tableau 46 : Période démonstrative des processus couvrant toutes les catégories de Pluie-Débit représentatives pour la période – Chauconin**

n° épisode effective	Date/heure début	catégorie hydrogramme	catégorie pluie	somme de pluie mm	temps en h sec
1	28/06/2014 11:00	3	3	11	>257
2	05/07/2014 05:00	1	2	7	15
3	06/07/2014 10:00	1	1	6	17
4	07/07/2014 19:00	2	3	6	27
5	09/07/2014 14:00	4	2	21	13
6	11/07/2014 01:00	4	3	45	17
7	13/07/2014 08:00	3	2	5	34
8	27/07/2014 19:00	1	1	10	337
9	28/07/2014 02:00	1	2	13	5
10	29/07/2014 19:00	1	1	9	31
11	20/02/2015 07:00	2	3	12	> 72
12	22/02/2015 23:00	1	3	12	30
13	25/02/2015 10:00	2	3	8	41
14	01/03/2015 00:00	2	1	3	47
15	01/03/2015 20:00	3	2	5	18
16	24/03/2015 16:00	1	2	9	242

#### 8.5.2.3 Estimation des pertes

Le site étant nu, on considère qu'il n'y a pas de transpiration, juste de l'évaporation (E), qui n'est pas connue car non mesurée. Cette valeur sera estimée à partir des hauteurs des événements qui ne produisent aucun écoulement et des hauteurs minimales des événements qui produisent un écoulement. On estime ensuite les pertes brutes. Ici, on rappelle que cette perte est de 1,4 mm par pluie journalière considérée comme perte initiale. Cette valeur de perte initiale est basée sur l'observation de la réponse pluie débit, voir § 8.2. Cette valeur de 1,4mm par pluie journalière est divisée par 24 h afin de répartir une perte horaire dans la simulation.

#### 8.5.2.4 Estimation du bassin versant

La surface de bassin versant est une des données d'entrée dans le modèle de GR4H\_Drain. D'après les relevés topographiques réalisés en avril 2014, la surface du bassin versant connectée au CD instrumenté est 8600m<sup>2</sup>.

L'acquisition mensuelle de la pluie ( $Q_{\text{entrée}}$ : mm) et le volume mesuré en sortie du CD ( $Q_{\text{sortie}}$ : mm) sont rapportés dans le Tableau 47.

Tableau 47 bilan d'eau –Chauconin (07/2014 au 03/2016)

Mois	Pluie(Q <sub>entrée</sub> : mm)	Volume de CD: débit/8600m <sup>2</sup>	perte initiale de 1,4 mm/jour pleut	pluie nette (mm)	Ratio de volume CD (m <sup>3</sup> )/pluie nette (m)
juil-14	142	79	19.6	122.4	5551
août-14	67	50	28	39	11026
sept-14	18	3	15.4	2.6	9923
oct-14	66	34	28	38	7695
nov-14	55	70	23.8	31.2	19295
déc-14	70	52	23.8	46.2	9680
janv-15	39	38	25.2	13.8	23681
févr-15	43	35	18.2	24.8	12137
mars-15	39	21	14	25	7224
avr-15	41	16	12.6	28.4	4845
mai-15	38	23	21	17	11635
juin-15	7	1	4.2	2.8	3071
juil-15	20	1	14	6	1433
août-15	76	25	22.4	53.6	4011
sept-15	54	24	15.4	38.6	5347
oct-15	39	24	19.6	19.4	10639
nov-15	64	43	28	36	10272
déc-15	29	20	15.4	13.6	12647
janv-16	53	43	23.8	29.2	12664
févr-16	44	35	25.2	18.8	16011
mars-16	103	62	23.8	79.2	6732
Σ	1107	699	421	686	9787
NB:* données de la pluie collectée de "Météo France"					

Les données du 1<sup>er</sup> juillet 2014 au 31 mars 2016 sont exploitées. Les données brutes de la pluie mensuelle (mm) sont listées dans la colonne 1. La perte initiale est de 1,4 mm par pluie journalière (déterminé au § 8.2). Le cumul mensuel en sortie de CD, est représenté par le résultat de cumul du débit mesuré divisé par la surface de bassin ferroviaire 8600m<sup>2</sup> (colonne 2). Le ratio de volume mensuel de l'eau du CD à la pluie mensuelle nette est listé dans la colonne 3.

Pendant la période de dysfonctionnement (~22%) du pluviographe, les données de la pluie journalière de la station météo de la ville de Meaux ont été utilisées. Compte tenu de la dynamique du système il n'était pas possible de faire un bilan épisode par épisode et nous avons procédé à l'établissement de bilans mensuels. Au lieu de l'intégration des volumes rapide et lent sur chaque hydrogramme afin de trouver une gamme de coefficient de ruissellement, on choisit ce bilan d'eau mensuelle afin de déterminer la valeur moyenne de coefficient de ruissellement sur le



site de Chauconin. En effet plus de 50% des pluies sont en série et engendrent des hydrogrammes avec des courbes de décrue incomplètes ne permettant pas l'analyse événement par événement.

En considérant que le CD est localisé dans les emprises ferroviaires, avec peu de végétation aux abords, on considère une évapotranspiration nulle en hiver. Dans ce cas là, on fait le moyenne du ratio de volume d'eau écoulée dans le CD et de la pluie en l'hiver : de décembre à février chaque année. La valeur estimée (9787 m<sup>2</sup>) est plus grande que la surface calculée à partir du levé topographique sur le site.

### **8.5.3 Simulation de GR4H-Drain**

Dans notre cas d'étude, les données de pluie/débit du mois de juillet 2014 sont utilisées pour caler le modèle GR4h\_Drain, et les données de période hivernale (du 17/02/2014 10 :00 au 27/03/2014 10 :00) sont utilisées pour valider ce modèle modifié (Figure 76). Ces deux périodes sont retenues car elles couvrent tous types d'hydrogrammes et phénomènes chimiques dans le CD (§ 8.5.2.2).

Dans les deux cas, on a un bilan supérieur de 90% (une valeur supérieure à 75% est considérée bonne). Les critères de Nash (critère pour valider la simulation de débits de pointe), de racine carrée de Nash (pour valider la simulation des débits de valeurs moyennes) et de ln (Nash) : pour valider la simulation de débits de faibles valeurs, sont tous supérieurs à 80% qui nous confirment une simulation satisfaisante. Les valeurs des quatre paramètres retenues pour les simulations sont listées dans le Tableau 48.

D'après la simulation de ce modèle conceptuel, le temps de réponses (paramètre X4) lié au ruissellement est respectivement 30 min et 1h30 pour la période estivale et hivernale. Pendant ces deux périodes, il n'y a pas d'échange avec la nappe locale (paramètre X2 égale 0), l'infiltration dans les matériaux drainants est identique (paramètre X3) et l'infiltration de la plateforme est plus élevée en été (paramètre X1). Ces valeurs simulées correspondent aux conditions in situ : temps de réponse autour de 2h, nappe plus profonde que l'entrée d'eau du CD (pas de contribution de débit), tous les ruissellements de plateforme passent par le matériau drainant, et l'eau infiltrée dans la plateforme ferroviaire s'accumule partiellement à l'interface sous-couche - couche de forme en période hivernale.

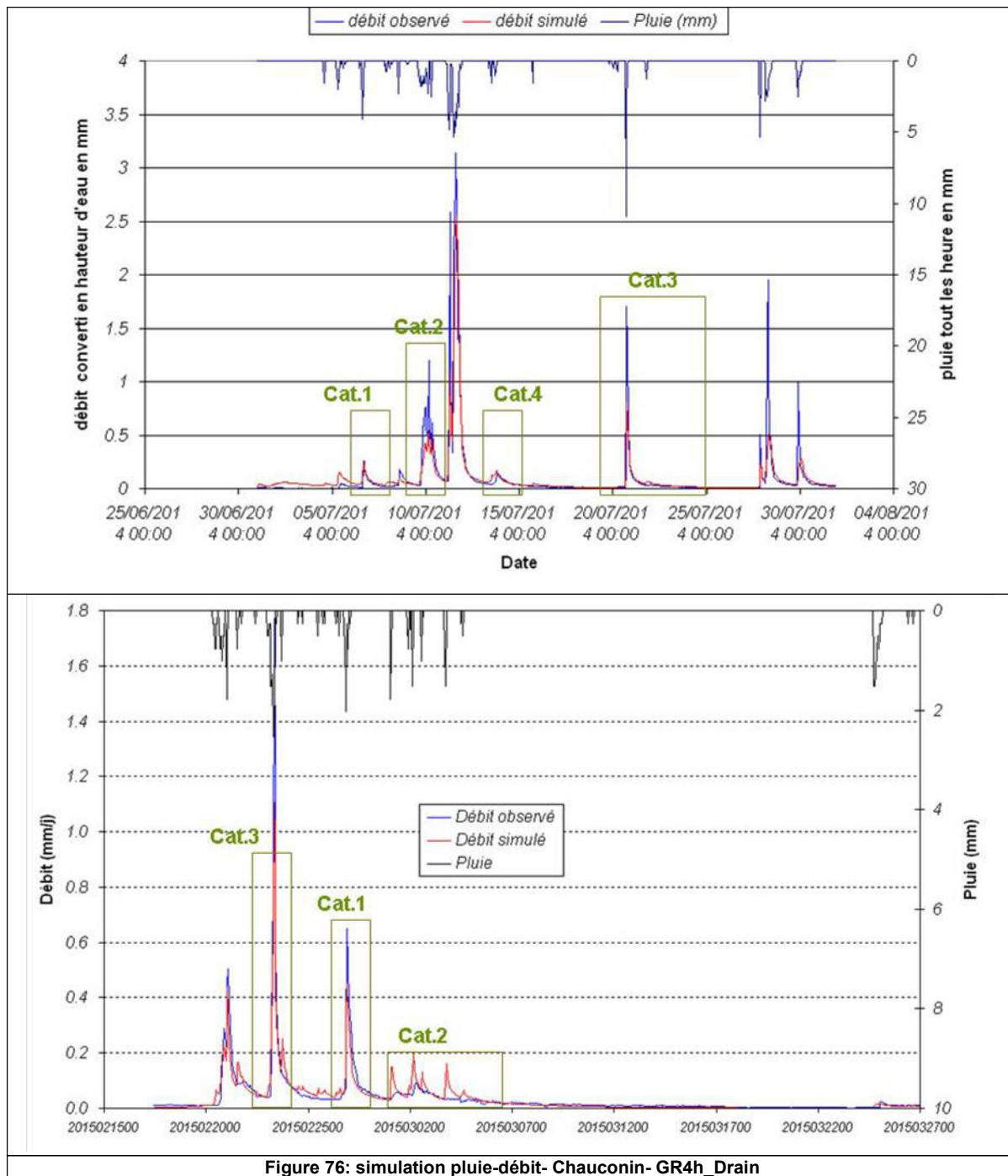


Figure 76: simulation pluie-débit- Chauconin- GR4h\_Drain

On constate aussi qu'une part importante de la pluie ruisselle en surface : la fraction estimée du ruissellement par la simulation est de 57% en été, et 53% en hiver. Ces valeurs sont légèrement plus faibles (écart <10%) que la valeur obtenue par séparation de l'hydrogramme réel (64% de ruissellement rapide) par la méthode de pente constante (vois § 8.2), et beaucoup plus faible (écart > 20%) que la valeur théorique (85%) provenant du référentiel SNCF Réseau (IN3278, 2006).

**Tableau 48 Paramètres optimisé pour la simulation et critères de Nash**

**Pluie de juillet 2014**

Paramètres modèle	
<i>x1: Capacité rés. production (mm)</i>	49.4
<i>x2: Paramètre d'échange (mm)</i>	0.0
<i>x3: Capacité rés. routage (mm)</i>	4.5
<i>x4: Délai (h)</i>	0.5
Valeurs initiales	
<i>Taux de remplissage initial S0/x1</i>	0.7
<i>Taux de remplissage initial R0/x3</i>	0.0
Critères d'efficacité (%)	
<i>Nash(Q)</i>	80.1
<i>Nash(VQ)</i>	84.1
<i>Nash(ln(Q))</i>	81.4

**Pluie du fév. au mars 2015**

Paramètres modèle	
<i>x1: Capacité rés. production (mm)</i>	33.1
<i>x2: Paramètre d'échange (mm)</i>	0.0
<i>x3: Capacité rés. routage (mm)</i>	4.5
<i>x4: Délai (h)</i>	1.5
Valeurs initiales	
<i>Taux de remplissage initial S0/x1</i>	0.7
<i>Taux de remplissage initial R0/x3</i>	0.0
Critères d'efficacité (%)	
<i>Nash(Q)</i>	87.8
<i>Nash(VQ)</i>	87.4
<i>Nash(ln(Q))</i>	73.4

Cette eau produite par la grande surface de la plateforme au lieu de la petite surface des matériaux drainant aura une composition dans le CD de type sulfatée calcique liée à la composition chimique (gypse et calcaire) de la plateforme.

## 8.6 Fonctionnement hydrochimique du système

La simulation précédente nous permet d'estimer plus précisément les différentes fractions d'eau dans le CD et leur rôle dans son fonctionnement chimique. En fonction des fractions d'écoulement rapide (Qr) et d'écoulement lent (Ql), de leurs caractéristiques physico-chimiques, et de leur mélange avec l'eau présente initialement dans le CD, la variation instantanée des caractéristiques physico-chimique à l'exutoire de notre bassin versant ferroviaire peut être évaluée.

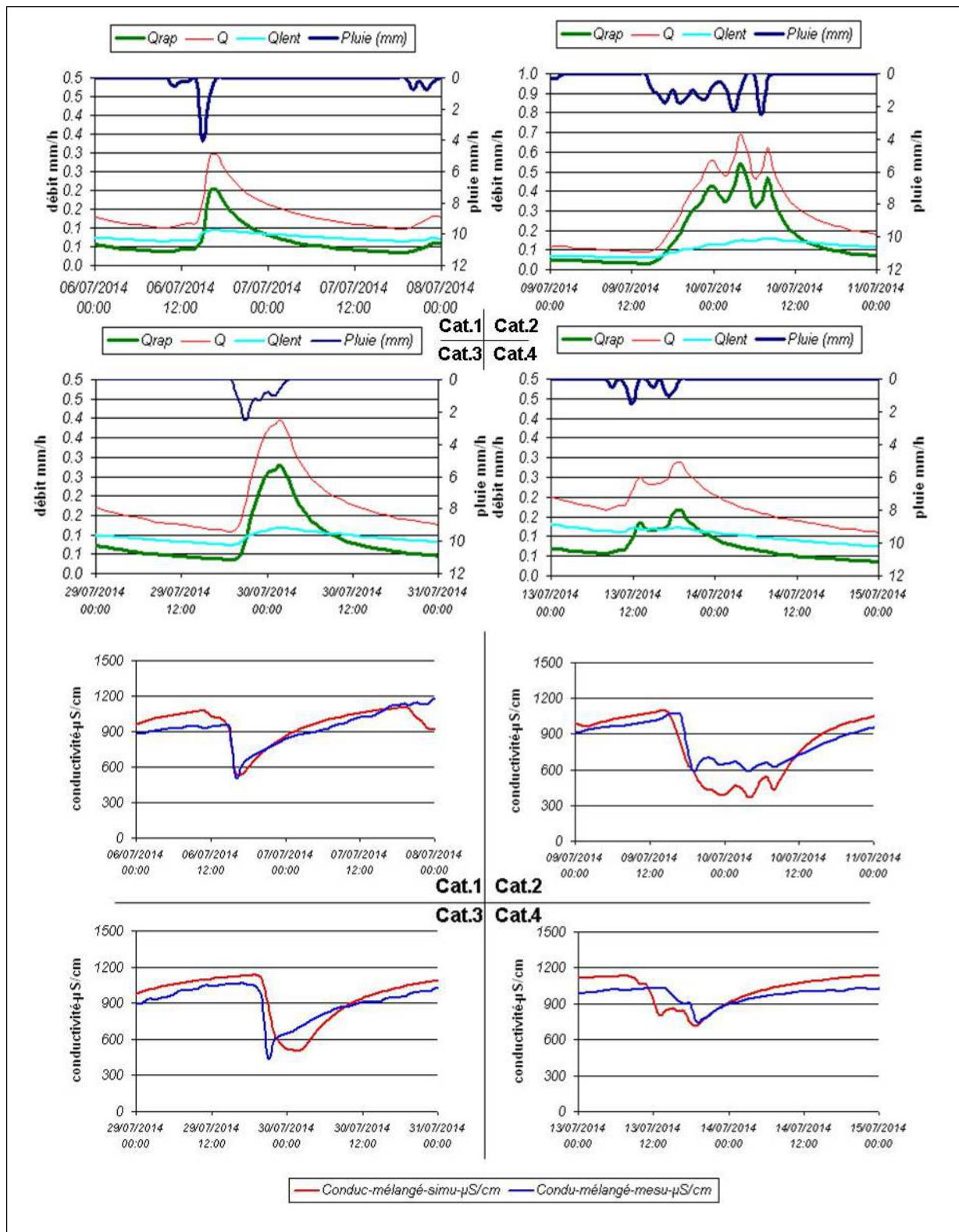


Figure 77: Simulation de la répartition de débits et évolution de la conductivité – juillet 2014

NB : Hypothèses de simulation de la conductivité : Solution 1 : Q- rapide (0µS/cm) ; Solution 2 : Q-lent (2700µS/cm) ; Solution 3 : Q-CD (1200µS/cm)

Ici, dans un premier temps, on estime cette évolution chimique à l'exutoire par une approche basée sur un mélange des divers débits avec des fractions simulées dans GR4H\_Drain. On impose aussi la condition selon laquelle on se place en permanence à l'équilibre thermodynamique de l'eau en contact avec les matériaux in situ. Nous utiliserons la conductivité pour représenter l'évolution physico-chimique de l'eau dans le CD. Nous extrayons des résultats de simulation de GR4H\_Drain, les valeurs simulées de Q\_rapide et Q\_lent au pas de temps horaire.

La conductivité de Q\_lente est égale à celle des eaux des piézomètres de la plateforme (~2700 $\mu$ S/cm). La conductivité de Q\_rapide est proche de celle de la pluie, mais légèrement plus élevée en raison du ruissellement de surface (200-300 $\mu$ S/cm). Enfin la conductivité de l'eau présente initialement dans le CD est estimée sur la base des mesures en moyenne à 1200  $\mu$ S/cm. Ainsi on estime la conductivité instantanée de l'eau dans le CD pour un épisode (Figure 77 : épisode estival 2014 et Figure 78 : épisode hivernal 2015).

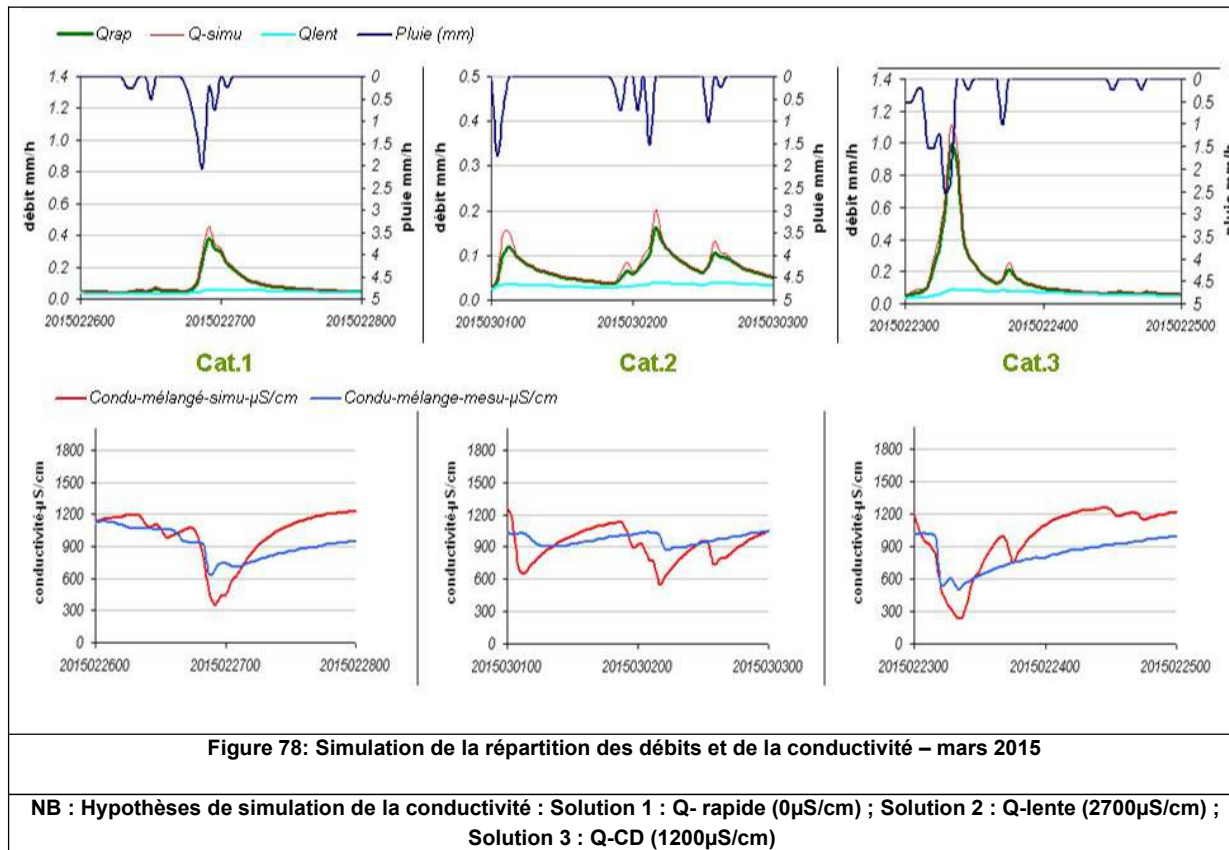
Sur les deux séries de données, la courbe de la conductivité simulée suit une tendance similaire à celle de la courbe de la conductivité mesurée in situ, notamment les chutes se superposent bien et les deux courbes mesurée et simulée varient dans le même sens avec la même amplitude. De manière globale, les résultats des simulations sont satisfaisants.

Il apparait toutefois des décalages pendant certaines brèves périodes de quelques centaines de  $\mu$ S/cm. Sur ces périodes se produisent des changements dans la thermodynamique de précipitation-dissolution de la calcite, et l'hypothèse d'équilibre thermodynamique n'est plus vérifiée. Par exemple, la formation de 0.5 mM de calcite produit une diminution de la conductivité d'environ 150 $\mu$ S/cm.

De plus, la simulation de la conductivité (C25) d'une période de type T2 (remontée au cours de l'écoulement lent) est surestimée (env. 300  $\mu$ S/cm), particulièrement en hiver. Cette surestimation au moment de la remontée peut avoir deux explications possibles : soit une surestimation de la fraction d'écoulement lent par le GR4H\_Drain, soit la calcite commence déjà à précipiter dès la survenue de l'écoulement lent. Une simulation dynamique du fonctionnement hydro-chimique (couplage de l'hydrique et de la chimie, Chapitre 9) est proposée pour répondre à cette question.

L'ensemble de cette analyse permet d'avoir une représentation plus claire du fonctionnement du système. Elle confirme que le système de Chauconin peut être représenté la plupart du temps comme trois solutions en mélange en équilibre thermodynamique. Selon les configurations, chaque solution peut être dominante. Cette représentation nous permet de construire un modèle hydrogéochimique spécifique dans le but plus précis de chercher les causes et les processus de

formation de la calcite et de permettre une optimisation de la gestion opérationnelle de ce phénomène.



## 8.7 Epilogue du chapitre

Dans ce chapitre, une analyse de fonctionnement du système de CD et une analyse de la séparation de l'hydrogramme du CD vis-à-vis de la pluie nous confirme que le CD étudié est sujet à deux écoulements d'échelles de temps différentes : écoulement rapide (ruissellement sur la plateforme traversant les matériaux drainants) pendant l'échelle de temps horaire et écoulement lent (infiltration dans la plateforme) à l'échelle de temps journalière. La fraction estimée du ruissellement par séparation de l'hydrogramme (64% de ruissellement rapide) par la méthode de pente constante (§ 8.2), est plus faible que la valeur théorique (85%) (SNCF, 2006).

Le CD est à l'air libre, influencé par la température de l'air et du sol encaissant. Il constitue un système fermé à la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique pendant les épisodes pluvieux journaliers (court terme) et arrive à l'équilibre avec la  $p\text{CO}_2$  plusieurs jours après la pluie. L'évolution de la chimie de l'eau du CD dépend des conditions limites du terrain et des arrivées des deux types d'écoulements issus de la pluie : écoulement

rapide (ruissellement de plateforme avec indicateur chimique de conductivité C25 de 250  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en moyenne) et lent (C25 de 2700  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en moyenne).

Une première approche d'étude de l'évolution chimique de l'eau du CD consiste à considérer un mélange des divers débits avec des fractions simulées de GR4H\_Drain, en condition permanente d'équilibre thermodynamique de l'eau en contact avec les matériaux in situ. La conductivité de l'eau est retenue comme indicateur permettant de représenter l'évolution physico-chimique dans le CD. De manière générale la simulation est satisfaisante montrant une fraction de ruissellement estimée à 57% en été, et 53% en hiver à l'exception de certaines courtes périodes où la calcite précipite. Une simulation dynamique du fonctionnement hydro-chimique (couplage du fonctionnement hydrologique et de la chimie, Chapitre 9) doit être effectuée afin de détailler ces particularités de fonctionnement.

## **Chapitre9 Modélisation couplée du fonctionnement physique et physico- chimique du site de Chauconin**

A partir des résultats d'acquisition (Chapitre 8) du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du système du collecteur drainant (CD) sur le site de Chauconin, dans ce chapitre, on propose un modèle conceptuel pour le représenter. Ce modèle conceptuel est le résultat du couplage d'estimations physiques et d'estimations géochimiques obtenues respectivement au moyen du modèle GR4H\_Drain (Chapitre 8) et au moyen du logiciel PHREEQC version 3.0 de l'USGC (Parkhurst et Appelo, 2013).

Ce modèle conceptuel sert à répondre aux questions thermodynamiques et cinétiques relatives à la formation de la calcite dans le système du CD en fonction de 3 conditions d'écoulements différentes (périodes/temps T1 à T3, chapitre 8 § 8.4) : écoulement rapide (T1), lent (T2) et nul (T3). Dans le présent chapitre on renomme ces « temps » de l'écoulement (T1 à T3) « scénarios » d'évolution de la chimie de l'eau du CD (Scénario 1 à 3). Les descriptions détaillées sont présentées dans le § 9.3.1.2.

Le modèle couplé est calé et validé avec les mesures en continu du pH, et les données de conductivité (C25) sont utilisées pour vérification. Le modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéochimique a pour ambition d'être adapté à d'autres sites afin d'estimer le risque de formation de calcite en phase de conception ou de régénération d'une ligne.

Parmi les modèles thermodynamiques et cinétiques adaptés à une eau de faible force ionique (étude de cas :  $I < 1 \text{ mol/l}$ ), PHREEQC est particulièrement utilisé (Blasco et al., 2017; Boluda-Botella et al., 2008; Charlton and Parkhurst, 2011; De Lucia and Kühn, 2013; Mastrocicco et al., 2012; Navarre-Sitchler and Jung, 2017; Tiruta-Barna, 2008) dans les calculs hydrogéochimiques pour les raisons suivantes : facilité d'utilisation, stabilité numérique, compatibilité avec plusieurs bases de données thermodynamiques et cinétiques, facilité d'adaptation à des cas particuliers.

PHREEQC permet aussi de simuler le transport de masse réactif (ex : dissolution des matériaux encaissants du collecteur drainant pendant l'infiltration), ce qui correspond à la combinaison de réactions d'équilibre thermodynamique et de processus cinétiques avec transport convectif et dispersif.

Par ailleurs, PHREEQC est un outil en accès libre compatible avec différentes plateformes de programmation de type R. Même si dans ce travail de recherche, le couplage d'estimations physiques (GR4H\_Drain) et géochimiques (PHREEQC) est réalisé sous Excel, son automatisation sous R est une perspective industrielle.



Malgré la flexibilité générale de PHREEQC, une attention soutenue doit être portée à l'utilisation de l'outil vis-à-vis du sens des équations proposées et de l'absence de certaines phases minérales (pas de donnée expérimentale) dans la base de données. On complète alors cette base par les données d'une autre base de données.

## 9.1 Conception d'un modèle couplé pour la quantification des processus

Sur la base des résultats du fonctionnement physique du système étudié décrit au chapitre 8 (§ 8.2), il est possible de représenter conceptuellement le fonctionnement du système représentant les processus chimiques (Figure 79).

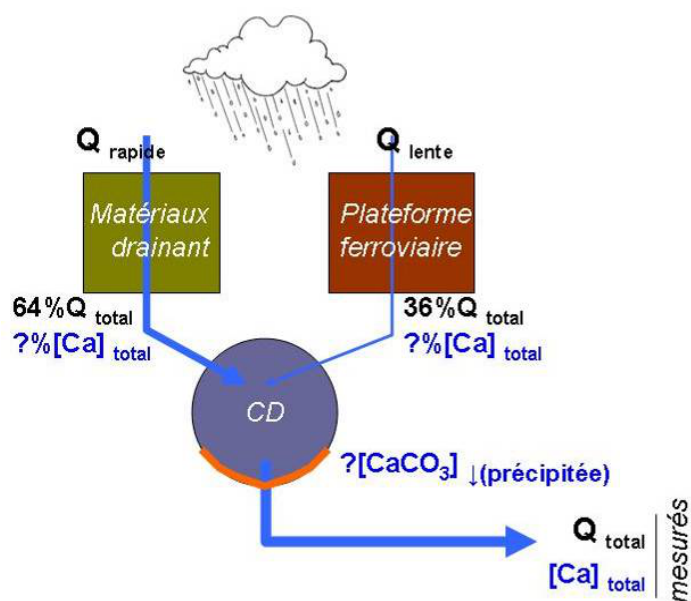


Figure 79 : Schéma de fonctionnement du système étudié – Chauconin

NB : Q- écoulement produit parla pluie ; [Ca] – calcium dissout apporté par les écoulements

Tout d'abord, on fait un bref rappel des trois conclusions essentielles précédentes (chapitre 8) :

- Lors d'un épisode pluvieux, deux écoulements : rapide (débit de décrue : 64% de la pluie nette) et lent (débit de tarissement: 36% de la pluie nette), se produisent dans le système étudié; L'écoulement rapide se traduit par une courbe de décrue à échelle de temps horaire et l'écoulement lent par une courbe de tarissement à échelle de temps journalière ;

- L'écoulement rapide conduit à une chute de la conductivité (de 1200 à 300  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en moyenne) et du pH (de 11 à 8 en moyenne) de l'eau du CD ;
- L'écoulement lent conduit à une augmentation de la conductivité (de 300 à 1200  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en moyenne) et du pH (de 8 à 11 en moyenne) de l'eau du CD.

Sur la base de cette représentation, on considère que lors d'un évènement pluvieux, les écoulements rapides et lents produits s'enrichissent en calcium dissout (quantité et dynamique inconnues), tandis que le collecteur drainant (CD) vecteur de ces écoulement, est le siège de la précipitation de la calcite. Les questions qui se posent sont les suivantes:

- Lors d'un évènement pluvieux, quelle fraction du calcium dissout dans l'eau du CD provient de l'écoulement rapide ? Quelle fraction provient de l'écoulement lent ?
- Lors de ce même évènement pluvieux, quels processus chimiques se produisent dans la colonne de matériaux drainants et quelle est leur dynamique? Quels processus se produisent dans la colonne de la plateforme, et quelle est leur dynamique ?
- Lors d'un évènement pluvieux, quelle quantité de calcite ( $[\text{CaCO}_3]$ ↓, Figure 79) est précipitée dans le CD ?

Dans un premier temps, afin de répondre à la première question, une analyse de la base de données relative à la chimie d'eau est réalisée. Les deux questions suivantes seront abordées lors des simulations dynamiques du système sous PHREEQC. Dans ce chapitre, le paramètre horaire issu des simulations est restitué sous forme décimale (ex : 15 000 seconds = 250 minutes = 4,17 heures).

## 9.2 Fractions du calcium dissout dans les écoulements rapide et lent

Une première analyse de la chimie des différentes eaux impliquées dans le système : eau de pluie, eau de la plateforme et eau du CD est représentée Figure 80 et Figure 81. Cinq mesures (pH,  $T^\circ\text{C}$ , C25,  $[\text{Ca}^{2+}]$  et  $[\text{SO}_4^{2-}]$ ) et une valeur estimée :  $\text{pCO}_2_{\text{dissout}}$  sont prises en compte dans cette coupe pour illustrer l'évolution chimique de l'eau entre le Bassin Versant (BV) amont et le système de CD en aval.

T°C, pH, pCO<sub>2\_dissout</sub>, et [Ca<sup>2+</sup>] sont les 4 variables essentielles pour l'étude de l'équilibre du système calco-carbonique. La conductivité (C25) est un indicateur lié au mélange de l'écoulement rapide (Q rapide) et de l'écoulement lent (Q lent), et peut aussi être estimée par les ions majeurs (chapitre 7, § 7.1.2). [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] est un indicateur de l'écoulement lent venant de la plateforme. A l'exception des températures de l'eau de pluie et de la sous-couche/couche de forme, ponctuelles, les autres variables présentées dans la Figure 80 couvrent toutes les saisons de l'année.

Les valeurs de pCO<sub>2\_dissout</sub> dans la plateforme et dans le matériau drainant ne sont pas disponibles, et sont estimées à partir des mesures de pH et alcalinité en résolvant les équilibres chimiques avec PHREEQC.

La Figure 80 illustre la variabilité des quatre variables liées au système carbonate sur 12 campagnes de mesure. L'écoulement lent est riche en ions (valeur très élevée de la conductivité C25 : 2074 à 3370 µs/cm), aussi chargé de CO<sub>2</sub> dissout (pCO<sub>2\_dissout</sub> = 10<sup>3</sup> à 4 ppm, 20000 ppm en moyenne). Cette valeur reste possible avec un changement du pH (augmentation) par contact avec le sol traité à la chaux ce qui conduit à une baisse de CO<sub>2</sub> dissout.

L'écoulement rapide montre une faible concentration des ions car la pluie s'infiltré rapidement à travers le matériau drainant. Un calcul thermodynamique dans PHREEQC montre que l'eau en équilibre avec le matériau drainant a une conductivité (C25) de 200 à 300 µS/cm selon la température mesurée in situ. Cette eau issue de l'écoulement rapide a une pCO<sub>2\_dissout</sub> assumée constante autour de 400 ppm (similaire à la pCO<sub>2</sub> atmosphérique : 400 ppm ±10 (Chapitre 8, § 8.3.2)) vue la granulométrie de matériau drainant (3 à 5 cm).

L'eau drainée par le CD a des caractéristiques situées entre ces deux extrêmes : la C25 varie de 250 à 1500 µs/cm dans l'année. Les valeurs de la pCO<sub>2</sub> mesurées dans l'eau du caniveau drainant sont comprises entre 7 et 880 ppm, et les valeurs obtenues dans l'air du regard de CD sont comprises entre 346 et 879 ppm (Chapitre 8, § 8.3.2).

A la base de ces différentes amplitudes de pCO<sub>2</sub> observées dans différents endroits et phases, on observe que la pCO<sub>2</sub> dans l'air du regard du CD est comprise entre les valeurs inférieures (la pCO<sub>2</sub> atmosphérique : 400 ppm ±10) et les valeurs supérieures (pCO<sub>2\_dissout</sub> dans l'eau de la plateforme : 20000 ppm) ;

La pCO<sub>2</sub> dissout de l'eau du CD varie avec une amplitude (7 à 880 ppm) plus large que la pCO<sub>2</sub> dans l'air du regard de CD (346 à 879 ppm). C'est-à-dire que vis-à-vis d'un changement de pCO<sub>2</sub> du bassin versant en amont, la variation de pCO<sub>2</sub> dans l'eau du CD est plus dynamique que dans l'air du CD ;

Les  $p\text{CO}_2$  dans l'eau et dans l'air du CD ont une valeur supérieure identique (écart < 1% : 880 ppm vs. 879 ppm) ; C'est-à-dire qu'il y a autant de  $\text{CO}_2$  dans l'eau du CD que dans l'air du CD en valeur totale (conversions totales de  $\text{CO}_2$  entre l'eau et l'air du CD). Cette observation confirme que le CD est un système fermé à l'échelle du pas de temps d'acquisition choisi (horaire) ;

La Figure 81 présente un focus sur le calcium ( $[\text{Ca}^{2+}]$ ) et les sulfates ( $[\text{SO}_4^{2-}]$ ). On voit que l'amplitude de la concentration en calcium dissout ( $[\text{Ca}^{2+}]$ ) dans l'eau du CD (3,82 à 6,49 mM) est bien comprise entre celle de l'eau de la pluie (0 à 0,06 mM) et celle de l'eau de la plateforme (11,3 à 15,8 mM). C'est-à-dire que le calcium dissout dans l'eau du CD est le résultat du mélange des eaux des écoulements rapide et lent.

Il est alors possible d'estimer la concentration en  $[\text{Ca}^{2+}]$  de l'eau provenant du matériau drainant, en considérant que l'eau du CD (5,52 mmol/l de  $[\text{Ca}^{2+}]$  en moyenne de cinq campagne d'analyse d'eau du CD) est une moyenne pondérée par le débit de l'eau provenant du matériaux drainant (64% de pluie nette avec la dissolution de calcaire dans les matériaux drainants) et de la plateforme (36% de pluie nette avec 14,1 mmol/L de  $[\text{Ca}^{2+}]$  mesurée en moyenne).

La différence entre la concentration observée dans le CD (5,52 mmol/L de  $[\text{Ca}^{2+}]$ ) et celle de l'eau provenant de la contribution de l'écoulement lent (plateforme : 5,09 mmol/l), provient de l'écoulement rapide soit 0,43 mmol/L de  $[\text{Ca}^{2+}]$  correspondant au ruissellement de plateforme qui s'infiltré dans les matériaux drainants. Une simple estimation de la concentration dans l'eau de pluie à l'équilibre avec la calcite sous la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique à la température in situ (6 à 25 °C) est de 0,63 mmol/l en moyenne. Cela signifie que l'eau de ruissellement qui s'infiltré dans les matériaux drainants n'est pas à l'équilibre avec le calcaire du fait de sa plus faible concentration en  $[\text{Ca}^{2+}]$  : 0,43 mmol/L vs. 0,63 mmol/l.

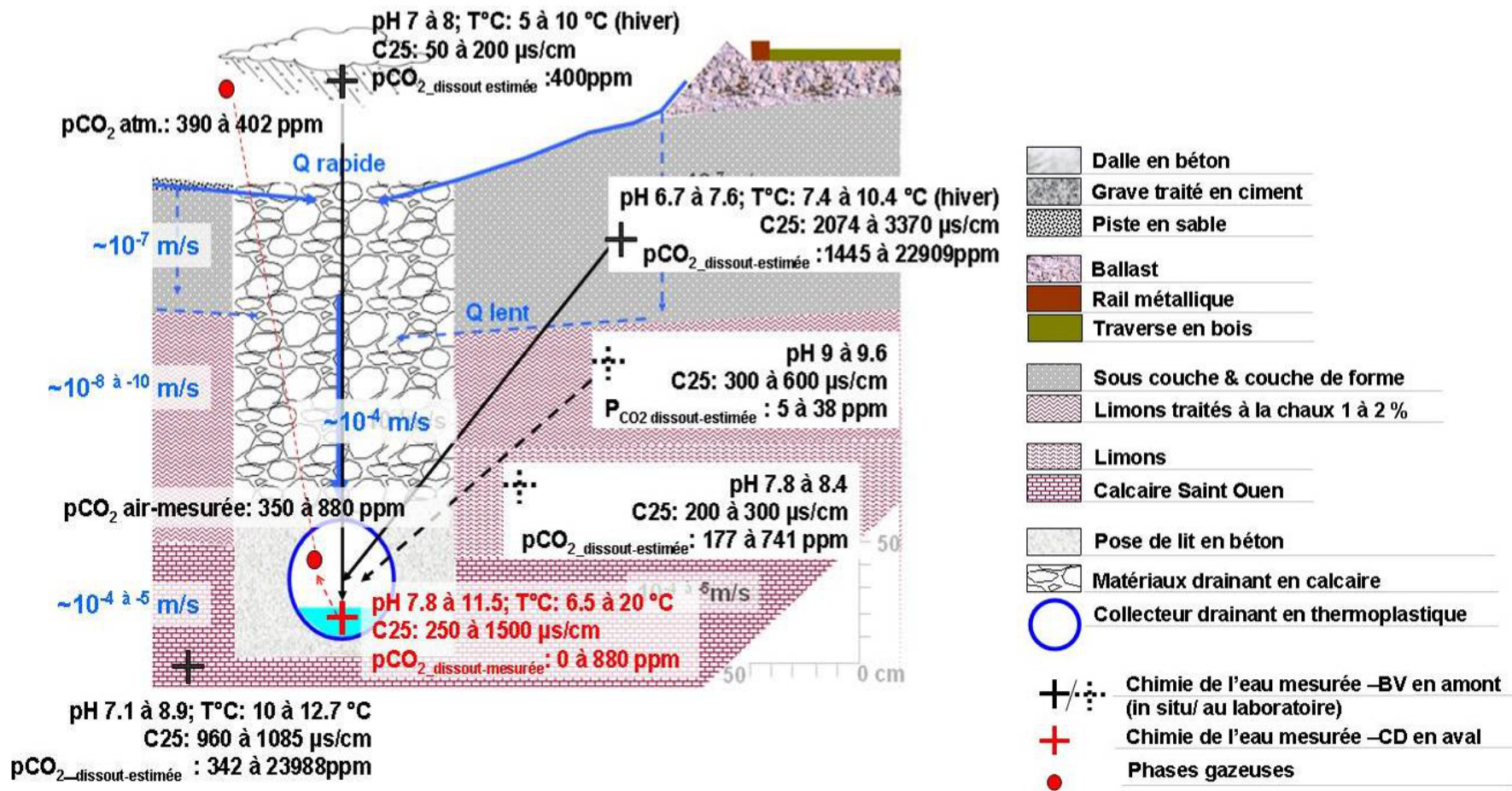


Figure 80 : Evolution chimique de l'eau entre bassin versant en amont et collecteur drainant – pH/C25/pCO2



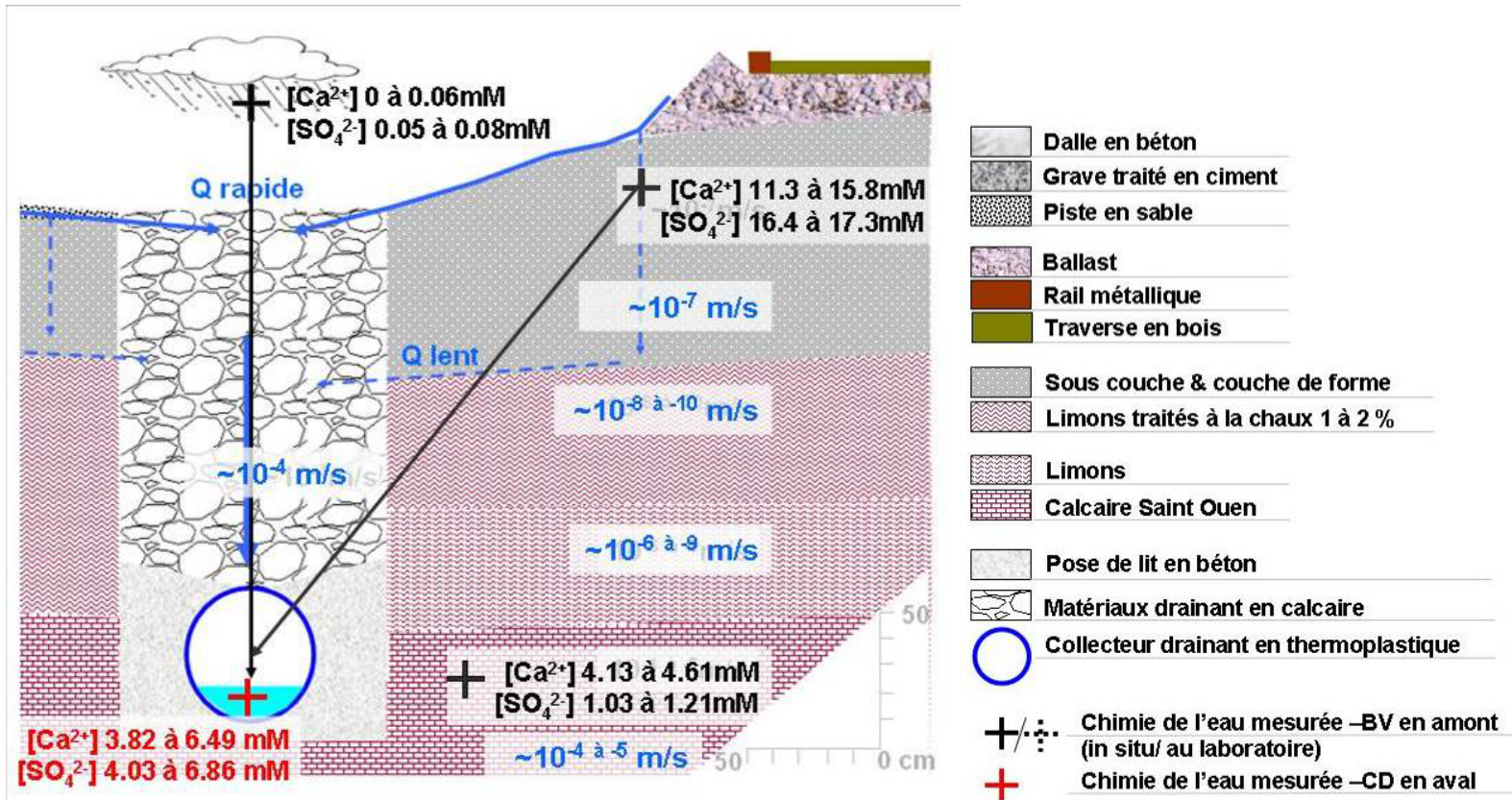


Figure 81 : Evolution chimique de l'eau entre bassin versant en amont et le collecteur drainant -  $[Ca^{2+}]$  et  $[SO_4^{2-}]$

En résumé, pour une eau du CD de concentration  $[Ca^{2+}]$  de 5,52 mM sur le site de Chauconin, l'ensemble de l'eau provenant de l'écoulement lent en plateforme contribue à 92% (5,09/5,52) et l'eau provenant de matériaux drainants contribue à 8% (0,43/5,52). On en conclut que les matériaux de la plateforme, surtout les matériaux des couches supérieures (sous-couche et couche de forme) contenant du gypse et du calcaire constituent les sources principales d'alimentation en calcium dissout dans l'eau du CD.

### **9.3 Simulation dynamique de la géochimie - PHREEQC**

Les résultats de l'analyse de la base de données de terrain de Chauconin indiquent un système à deux composantes rapide et lente du flux hydrologique, en réponse aux événements météoriques.

L'objectif essentiel du modèle conceptuel proposé ici est d'interpréter l'évolution de la chimie de l'eau au cours de son trajet entre l'évènement pluvieux et l'exutoire du CD, d'identifier les réactions chimiques majeures et de mieux comprendre le processus de précipitation de la calcite dans notre système.

#### **9.3.1 Développement du modèle conceptuel dans PHREEQC**

Notre approche consiste à combiner les caractéristiques des sols encaissants et des processus hydrologiques et géochimiques pour établir un modèle conceptuel hydrologique et géochimique complet du site d'étude.

La Figure 82 montre l'approche générale de modélisation utilisée. Tout d'abord, des données hydrologiques et chimiques ont été collectées pour développer un modèle conceptuel pour le site d'étude. Les données ont été obtenues à l'aide de diverses sources internes à la SNCF et à travers les données d'acquisition des campagnes de terrain.

Par la suite, le logiciel PHREEQC a été utilisé pour implémenter le modèle selon une approche par étapes de complexité croissante : les différents sous-systèmes et leurs composants sont ajoutés au fur et à mesure (bassin versant amont et collecteur drainant) ainsi que les variables de l'environnement ( $pCO_2$  dans le bassin versant en amont et la perméabilité des matériaux). Ensuite, le modèle a été calibré avec des données du suivi de chimie de l'eau du CD.

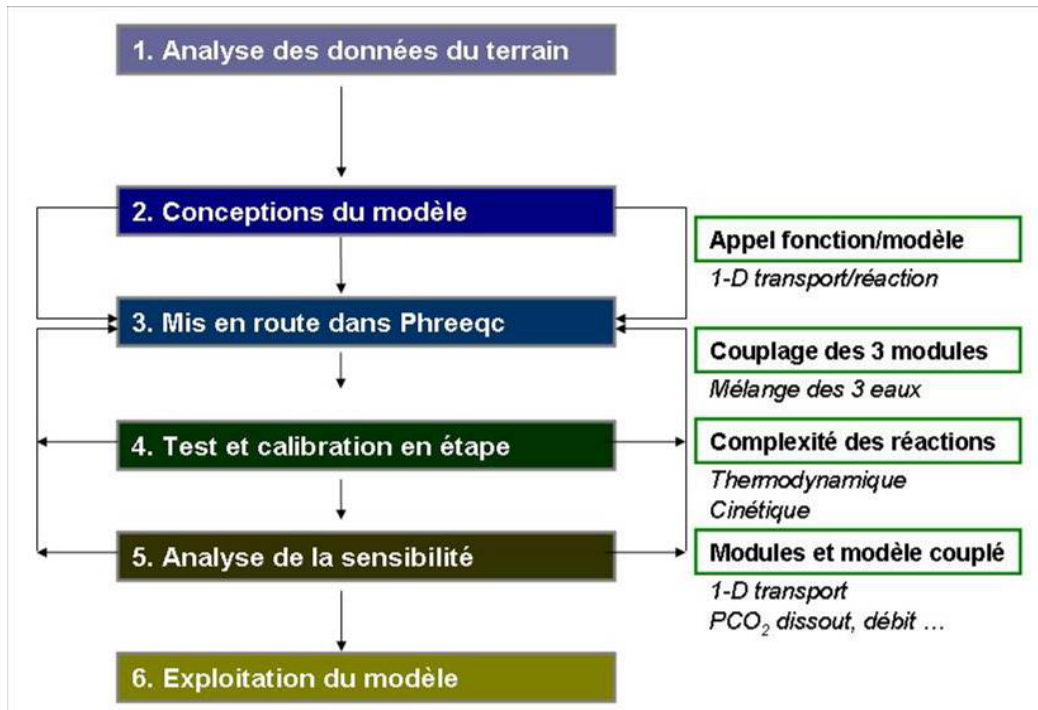


Figure 82 : Séquence de modélisation couplée utilisée dans l'étude de Chauconin

Les facteurs de mélange entre l'écoulement rapide et lent sont calculés par le modèle hydrologique : GR4H\_Drain (voir chapitre 8, § 8.6). Une analyse de sensibilité aux paramètres physiques a été menée sur la base du pH mesuré en continu. Par ailleurs, puisque l'on ne dispose pas de mesures en continu de  $pCO_{2\_dissout}$  dans les sous-systèmes de bassins versants en amont, une analyse de sensibilité à ce forçage a été également menée à partir des mesures de conductivité en continu dans le CD, afin de constituer un jeu de conditions initiales et limites dans les simulations.

Au final, le modèle est utilisé pour répondre aux questions 2 et 3 évoquées précédemment.

### 9.3.1.1 Equations et fonctions essentielles utilisées dans PHREEQC

#### a) Présentation de quatre fonctions de base de PHREEQC

Dans notre cas, l'eau sortant de deux colonnes de matériaux (drainant et de plateforme) qui peuvent être considérées comme des colonnes de lixiviation dynamique est mélangée avec l'eau présente dans le collecteur drainant considéré comme un réacteur bien mélangé où se produit la dissolution-précipitation de la calcite (Figure 84). L'utilisation des quatre fonctions principales (MIX, EQUILIBRIUM\_PHASES, KINETICS et TRANSPORT) dans PHREEQC est nécessaire dans notre application.



La dynamique des deux colonnes de lixiviation dynamiques est basée sur la fonction TRANSPORT qui appelle les trois autres fonctions. Dans le réacteur bien mélangé où la fonction de TRANSPORT est nulle, ne subsistent que les trois autres fonctions.

#### a-1) MIX

Ce mot clé est utilisé pour définir un mélange des solutions aqueuses. L'application d'un MIX appelle un calcul de batch-réaction qui produit des équilibres aqueux. Cette fonction peut être utilisée tout seule ou en couplage avec une autre fonction, par exemple, pendant le calcul de TRANSPORT.

#### a-2) EQUILIBRIUM\_PHASES

Ce mot clé est utilisé pour définir les quantités d'une phase solide ou gazeuse qui peut réagir réversiblement avec une phase aqueuse. Les conditions pour atteindre l'équilibre peuvent être prédéfinies par trois façons :

- fixer un pH final ;
- fixer un indice de saturation spécifique pour une phase minérale ou fixer une pression partielle d'une phase gazeuse ;
- donner le sens d'avancement d'une réaction.

#### a-3) KINETICS

Ce mot clé est utilisé pour lancer le calcul cinétique dans le sens d'avancement d'une réaction réversible dans laquelle on renseigne les valeurs des paramètres prédéfinis de cette fonction. Cette fonction est souvent utilisée dans les calculs de TRANSPORT, et peut aussi être utilisée dans un réacteur bien mélangé. Les expressions mathématiques pour calculer la vitesse d'une réaction cinétique peuvent être modifiées dans la base de données par le mot clé RATES. Dans le cas d'un réacteur bien mélangé où la cinétique est aussi un facteur, pour intégrer une fonction KINETICS, on peut aussi faire un appel au mot clé INCREMENTAL\_REACTIONS qui va définir les réactions qui se déroulent en précisant le nombre d'étapes et leur durée.

#### a-4) TRANSPORT

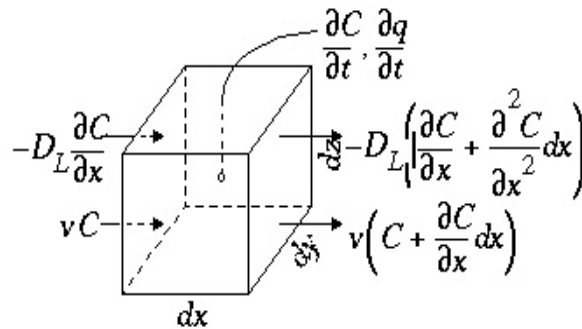
Ce mot clé est utilisé pour appeler une fonction qui simule les processus unidimensionnels du transport des solutés, colloïdes et chaleur. Les processus de base comprennent advection, dispersion et diffusion. Les équations fondamentales du modèle de transport 1-D sont rappelées ci-après.

Cette fonction peut lancer une simulation de la chimie du système étudié sous différentes conditions hydrauliques depuis un écoulement piston: advection pure et advection plus diffusion pour la colonne d'eau mobile, jusqu'à la diffusion pure uniquement pour la zone stagnante. Pour un modèle de transport dans la zone saturée, l'équation de Darcy est appliquée pour calculer la vitesse d'advection; dans la zone non saturée, l'équation de Richards est appliquée.

PHREEQC résout l'équation d'advection dispersion réaction par une méthode aux différences finies par pas fractionnaire: chaque pas de temps de la simulation est divisé en temps d'advection (tadv), temps de dispersion (tdiff) et temps de réaction (tréac). La colonne de sol est représentée par une superposition de cellules de même épaisseur.

Il y a huit paramètres opérationnels à fixer au préalable à toute simulation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (\text{Equation 1 : Advection dispersion réaction})$$



$$-v \frac{\partial C}{\partial x}$$

Variation de concentration liée au transport (vitesse et quantité de transport)

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Variation de concentration liée à la diffusion

$$mixf = \frac{D_L (\Delta t)_A}{n(\Delta x)^2} ;$$

$$(\Delta t)_A = \frac{\Delta x}{v}$$

(temps de transport)

$$D_L = D_e + \alpha_L v \quad (\text{diffusion dynamique, } \alpha_L \text{ - dispersivité})$$

$$-\frac{\partial q}{\partial t}$$

Variation de concentration liée à la réaction chimique (équilibre ou cinétique) ; temps de réaction = temps de transport

- nombre de cellules « N » qui décrit la colonne de sol;
- l'épaisseur de cellule « Δx » ;
- le nombre de pas de temps « K » qui définit la durée de la simulation ;

- le volume d'eau ( $\Delta PV$ ) injecté dans la cellule de surface à chaque pas de temps ;
- le pas de temps ( $\Delta t$ ) qui égale aussi le temps nécessaire pour qu'une eau de cellule n passe dans cellule n+1 ;
- le coefficient de dispersion théorique ( $\alpha L$ ) ;
- le coefficient de diffusion effective ( $De$ ) égal au coefficient de diffusion théorique \* porosité ( $\epsilon$ ) ; dans l'équation de l'advection / dispersion / réaction ;
- la nature des processus physico-chimiques qui se produisent dans la colonne de sol : équilibre instantané (mode « Equilibrium phase ») ou sous contrôle cinétique (mode « Kinetic ») ;
- Les conditions initiales (caractéristiques de la colonne de sol et de l'eau initialement présente) et les conditions limites (caractéristiques de l'eau rentrant dans la colonne au cours du temps).

## b) Equations de base du calcul de la chimie de l'eau dans PHREEQC

### b-1) Choix de la loi du calcul du coefficient d'activité

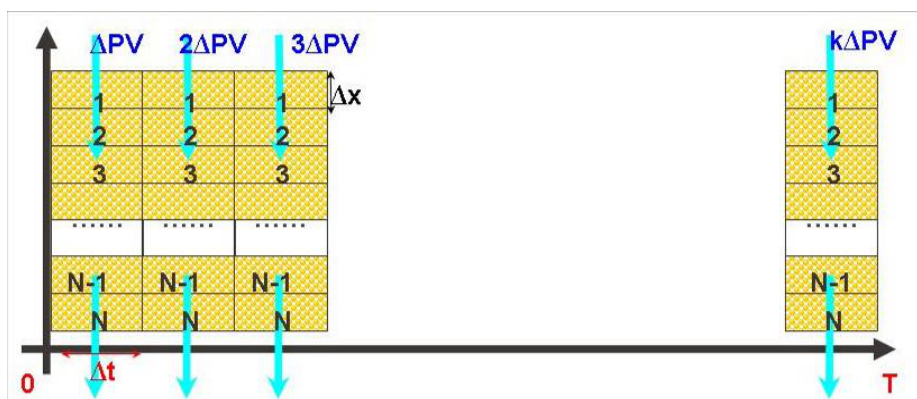


Figure 83: Algorithme de 1-D transport dans PHREEQC

**NB :** N : nombre de cellules ;  $\Delta x$  : longueur de cellule (m) ;  $N*\Delta x$  : Longueur totale de colonne de sol ;  $\Delta PV$  : le volume de pores à prendre en compte à chaque pas de temps ;  $\Delta t$  : pas de temps (s) ; T : durée totale de simulation ;  $K=T/\Delta t$  ; vitesse de transport =  $\Delta x / \Delta t$

Pour calculer les coefficients d'activités des électrolytes simples, la loi de Debye-Hückel et le modèle de Pitzer sont tous applicables dans le cas d'une faible force ionique ( $I < 0.1 \text{ mol/l}$ ). Dans le cas des électrolytes mixtes, la loi de Debye-Hückel est validée jusqu'à une force ionique de  $0.7 \text{ mol/l}$ , et le modèle de Pitzer est applicable jusqu'à une force ionique de  $7 \text{ mol/l}$  (Hamrouni and Dhahbi, 2002). Dans notre cas

des électrolytes mixtes, pour les ions monovalents et divalents, compte tenu de la faible force ionique des eaux testées ( $I < 0.02$  mol/L), les coefficients d'activité ( $\gamma_i$ ) sont tous calculés à partir de l'équation de Pitzer incorporée dans PHREEQC.

#### b-2) Equations et valeurs de la cinétique des phases minérales

Dans le cas de l'écoulement rapide dominant (scénario 1), le temps de contact de l'eau avec le matériau drainant (calcaire) est seulement de quelques heures, et inférieur au  $t_{1/2}$ , de la dissolution de la calcite, de l'ordre de la journée (Michard, 2002). La prise en compte de la cinétique est alors nécessaire. Par contre, le temps de séjour de l'écoulement lent est à échelle journalière, supérieur au  $t_{1/2}$  de la dissolution de la calcite. Dans le scénario 2 (écoulement lent dominant), on considérera que l'équilibre thermodynamique est atteint.

Tableau 49 : Synthèse bibliographique des valeurs cinétiques pour les phases minérales trouvées dans l'environnement du CD de Chauconin

Phases minérales	Expression de la cinétique dans PHREEQC et référence	R <sub>diss</sub> (dissolution)	R <sub>préc</sub> (précipitation)
Quartz SiO <sub>2</sub>	(Rimstidt and Barnes, 1980)	4.5×10 <sup>-14</sup>	1.4×10 <sup>-13</sup>
Calcite CaCO <sub>3</sub>	(Plummer et al., 1979)	1,14× 10 <sup>-7</sup> à 10 <sup>-8</sup>	
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	R <sub>dissout</sub> = rk* (1-Q <sup>1.9</sup> ) (Pokrovsky and Schott, 2001) <sup>1</sup> (Pokrovsky et al., 2009) <sup>1</sup> (Appelo and Postma, 2004) <sup>2</sup> (Arvidson and Mackenzie, 1997) <sup>3</sup>	1: 9.4×10 <sup>-8</sup> 2: 1.2×10 <sup>-10</sup>	3: 4.5×10 <sup>-25</sup> à 10 <sup>-16</sup>
Gypse CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	(Lebedev, 2015)	10 <sup>-6</sup>	
Kaolinite Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	(Devidal et al., 1997; Yang and Steefel, 2008)	1.2×10 <sup>-13</sup>	5.8×10 <sup>-15</sup>
NB: tableau de paramètres cinétiques (Hellevang et al., 2013); R <sub>diss</sub> et R <sub>préc</sub> : mol/cm <sup>2</sup> /s			

Les données cinétiques collectées dans la littérature appliquées aux matériaux du site de Chauconin sont listées dans Tableau 49. Elles sont utilisées dans les simulations de formation de la calcite pour le cas de Chauconin. Les résultats de la simulation sont comparés avec ceux de l'acquisition de terrain.

#### 9.3.1.2 Représentation conceptuelle du système

Compte tenu des éléments constitutifs du système, l'échelle de temps de l'écoulement dans la plateforme et le matériau drainant est beaucoup plus longue que celle de l'écoulement dans le CD (800m). Pour un débit de 0,3 l/s (dépassé uniquement 5% du temps au cours de la période d'acquisition) du CD, l'échelle de temps de réponse du matériau drainant est de 2 heures alors que celle de

l'écoulement dans le CD (coefficient de Manning Strickler de 40) est d'une demi-heure soit quatre fois moins environ.

Dans ce contexte, on émet est l'hypothèse que le CD se comporte comme un réservoir bien mélangé (0-dimensionnel) et que les observations collectées sur le CD sont représentatives de l'ensemble de son comportement. La même hypothèse a été faite lors des simulations pluie- débit avec GR4H\_Drain (Chapitre 8).

Au niveau des processus dans le sol, le système de drainage peut être décomposé en trois sous systèmes (sous modèles 1 à 3 : M1, M2, M3) : M1 constitué de la colonne de matériaux drainants très perméable, M2 constitué de la colonne de matériaux de la plateforme peu perméable, et M3 constitué du CD lui même. Chaque sous système est le siège de processus physiques de transfert d'eau et de processus physico-chimiques. Cette représentation en trois sous systèmes est illustrée dans la Figure 84.

Les éléments liés au processus de précipitation de la calcite sont présents au sein du système sous les trois phases gazeuse, liquide et solide. Ils circulent dans les différentes matrices de sol et d'eau (Figure 84) et réagissent en fonction du contexte physico-chimique. Dans l'ensemble du système, la chimie de l'eau dans le CD est bien fonction de la dynamique de l'eau du bassin versant en amont et de la chimie des eaux sortant du matériau drainant et de la plateforme (sous -couche et couche de forme).

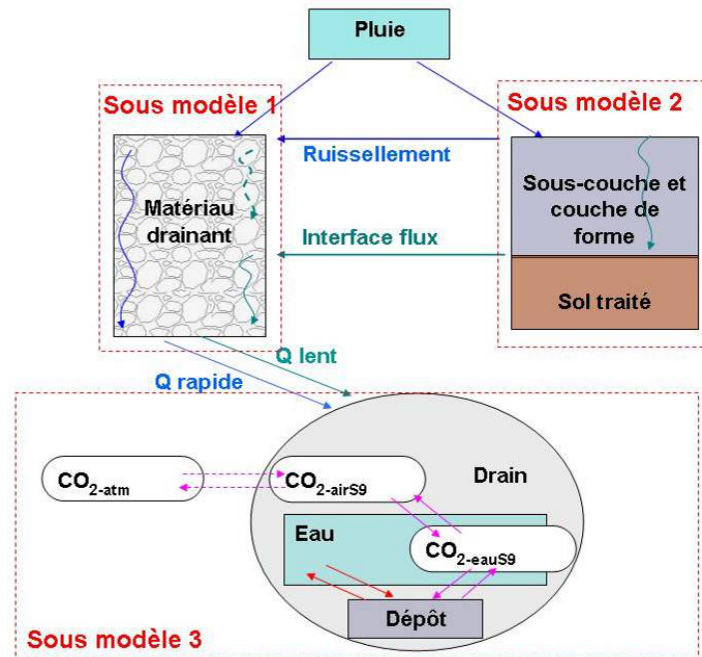


Figure 84 : Découpage en trois sous-systèmes (modèle) – Chauconin

Sur la base des résultats obtenus du fonctionnement hydrodynamique du CD, l'évolution de la chimie de l'eau sortant du CD sera simulée selon trois scénarios :

- Scénario 1, Scénario de période de pluie avec écoulement rapide c'est un couplage des sous modèle 1 et 3 avec comme condition initiale dans le CD une eau de temps sec;
- Scénario post-pluie avec écoulement lent (Scénario 2), c'est un couplage des sous modèles 2 et 3 avec comme condition initiale l'eau du CD à la fin du scénario 1 ;
- Scénario de temps sec de long terme (Scénario 3), c'est ce qui se passe dans le sous modèle 3 avec comme condition initiale une chimie de l'eau du CD équivalente à celle simulée à la fin du scénario 2.

Sur la base du fonctionnement des trois sous-systèmes présentés dans la Figure 84, nous présentons dans le Tableau 50.

Tableau 50 : Les variables d'état et de forçage du modèle – Chauconin

Fonctionnement	Variables d'état		Variables de forçage	Conditions initiales
Sous système 1 et scénario 1: matériau drainant	Physique	Débit	Pluie	Matériau drainant sec, perméabilité $10^{-4}$ m/s
	Chimique	pH, $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{pCO}_2$ dissout	$\text{pCO}_2$ atmosphérique Température de la pluie	pH de l'eau entrante après ruissellement = 8, matériau calcaire
Sous système 2 et scénario 2: plateforme	Physique	débit	Pluie	stock d'eau dans la plateforme, perméabilité $10^{-7}$ m/s
	Chimique	pH, $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ et $\text{pCO}_2$ dissout	$\text{pCO}_2$ dissout de l'eau de la plateforme Température	pH de l'eau entrante après ruissellement = 8, matériaux en calcite, dolomite, gypse et chaux
Sous-système 3, scénarios 1, 2, 3 : CD	Physique	Débit	Ratio débit rapide/lent	débit base imposé (0.02L/s)
	Chimique	pH, $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ et $\text{pCO}_2$ dissout	Température, évaporation, composition chimique de l'eau provenant des sous système 1 et 2	dépôt de calcite, $\text{pCO}_2$ - air du CD

### 9.3.1.3 Représentation mathématique du modèle couplé dans PHREEQC

a) modèle couplé basé sur les résultats de GR4H\_Drain

Sur la base des données acquises sur la chimie de l'eau du collecteur drainant (Chapitres 6 et 8), il est observé qu'une séquence typique de fonctionnement du CD aux plans physique et physico-chimique est constituée de la succession des trois scénarios 1, 2 et 3. Elle se répète de manière plus ou moins complète et plus ou moins longue tout au long de l'année en fonction des aléas météorologiques. Sur la base des principes des écoulements rapide et lent calculés avec GR4H\_Drain, la représentation du système a été décrite dans le § 9.1 et 9.2 (voir Figure 79). Ce modèle conceptuel est illustré Figure 85.

Le modèle se compose de trois modules :

- L'infiltration rapide dans les matériaux drainants ;
- L'infiltration lente dans la plateforme ;
- Le mélange de trois eaux : eau du CD avant la pluie, eau de l'infiltration rapide et lente du fait de la pluie.

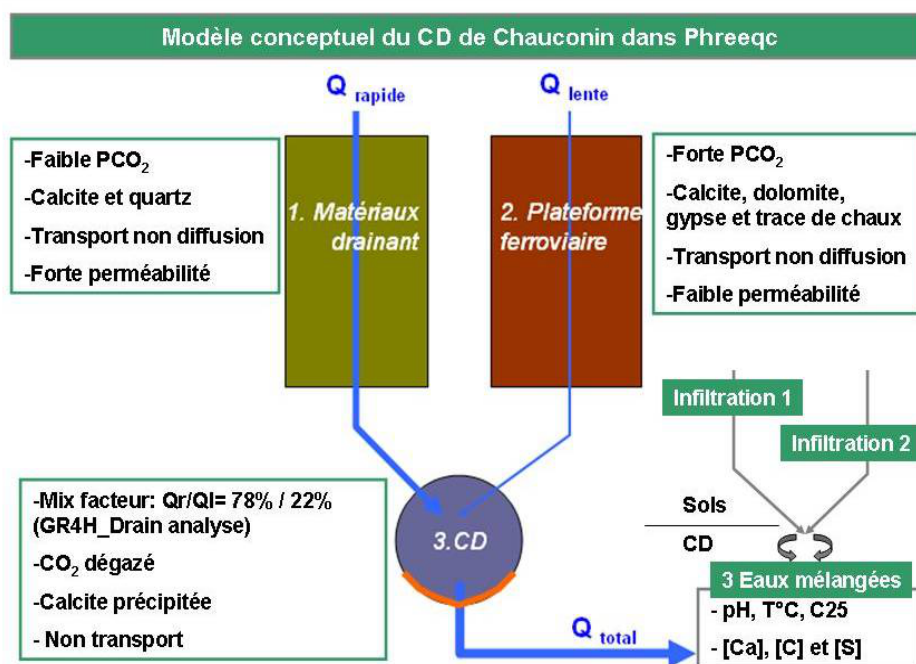


Figure 85: Modèle conceptuel du CD de Chauconin dans PHREEQC

A partir de ces conceptions et découpages, les détails des mises en route des trois sous modèles (matériaux drainant, plateforme et CD lui-même) dans PHREEQC sont résumés dans le Tableau 51.

Dans le sous modèle 1 et 2, on appelle la fonction « 1-D TRANSPORT » dans PHREEQC pour une simulation dynamique, et dans le sous modèle 3, on utilise essentiellement la fonction « INCREMENTAL\_REACTIONS » pour une simulation cinétique. Dans le sous modèle 1 et 2, des paramètres physiques doivent être calés avant l'exploitation de la simulation de la chimie.

Sur la base des hypothèses mentionnées auparavant (§ 9.3.1.2) et des résultats (débit rapide et lent) provenant du calcul de GR4\_Drain (chapitre 8, § 8.6), les représentations des trois scénarios dans PHREEQC par les couplages des sous modèles sont résumées dans le Tableau 52.



Tableau 51 : Détails des mises en route des trois sous modèles dans PHREEQC

Descriptions	Sous modèle 1	Sous modèle 2	Sous modèle 3
Type	Colonne de lixiviation		Réservoir bien mélangé
Fonction d'appel	1-D TRANSPORT		INCREMENTAL_REACTIONS
fonctionnement physique	Dynamique (advection-diffusion)		Stagnant
Données d'entrée : Physique -Q ; Chimique- [C]	Pluie ; [C]_pluie		Q nul ; [C] sortant de sous modèle 1 et 2
Réaction Thermodynamique	Dissolution de calcite		Précipitation de la calcite
Réaction Cinétique		Dissolution de gypse-dolomite	Evaporation d'eau
Paramètres calés	Vitesse d'advection		
	Coefficient de diffusion		
Forçages	pCO <sub>2</sub> dissout		Température
Données de sortie	pH, [Ca], [C], [S]		pH, Conductivité et [CaCO <sub>3</sub> ] <sub>d</sub>

Tableau 52 : Représentations de trois scénarios par modèles couplés dans PHREEQC

Descriptions		Sous modèle 1	Sous modèle 2	Sous modèle 3
Physique : Q (modèle GR4H_Drain)	Entrée	Pluie N		Qr+ Ql
	Sortie	Ecoulement rapide (Qr)	Ecoulement lent (Ql)	Débit (Qtotal)
Chimique : [C] (Modèle couplée PHREEQC)	Entrée	Pluie ; [C] pluie	Pluie ; [C] pluie	Débit de base constant (Qb) ; [C] CD_avant pluie N
	Sortie	Qr ; [C]r	Qr ; [C]l	Qb ; [C] CD_fin de scénario3
Scénario1 et 2		[C] CD_fin de scénario2= Qr * [C]r+ Ql * [C]l+ Qb * [C] CD_avant pluie N		
Scénario3		[C] CD_fin de scénario3= [C] CD_fin de scénario2 - [CaCO <sub>3</sub> ] <sub>d</sub>		

Pendant les scénarios 1 et 2, la simulation couplée est réalisée par le mélange des trois eaux dans les trois sous modèles. Pendant le scénario 3, la formation de la calcite est prise en compte dans la simulation.

b) Proposition d'un modèle simplifié en perspective du développement d'un outil opérationnel

Pour répondre aux perspectives industrielles de SNCF Réseau (chapitre 10) de disposer d'un outil d'aide à la décision « simple » mais non « simpliste » (approche « parcimonieuse »), nous proposons une représentation conceptuelle simplifiée du système de CD. Il s'agit d'un module de calcul de la quantité de calcite précipitée.

Cette deuxième représentation conceptuelle dans PHREEQC des trois sous-modèles et de leurs conditions limites est illustrée dans la Figure 86 en particulier le couplage des sous modèle 1 (colonne de matériau drainant pour la simulation de la variation de la chimie selon la verticale) et sous modèle 2 (colonne de plateforme saturée et stagnante) uniquement avec de la diffusion, pour l'échange chimique horizontal. Le sous-système 3 (caniveau drainant), est toujours un système bien mélangé avec évolution de la chimie. C'est-à-dire qu'une colonne d'eau dynamique (matériaux drainants) échange latéralement avec de l'eau statique (la plateforme) par la diffusion causée par l'écart des concentrations chimiques entre les deux colonnes, et puis cette eau verticale rejoint l'eau du CD, qui évolue au cours du temps.

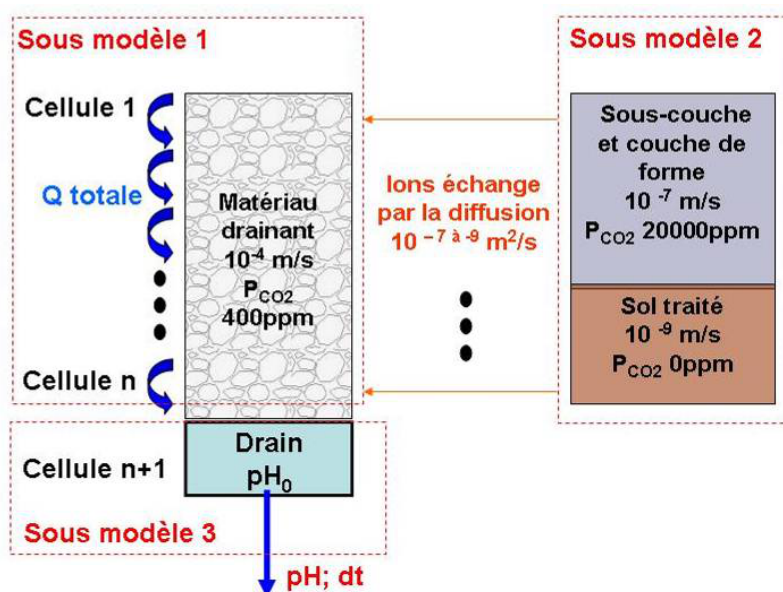


Figure 86: couplage de trois sous modèles –modèle conceptuel de Chauconin

Cette représentation conceptuelle est proposée selon les deux hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : tous les débits produits par la pluie circulent dans la colonne de matériaux drainants, et aucun débit ne provient de la plateforme qui est sursaturée ;

Hypothèse 2 : la diffusion d'ions dans l'eau de la plateforme (chargée en ions) vers l'eau de matériaux drainants (moins chargée) est uniquement liée à la différence des concentrations chimiques.

Tableau 53 : Représentations de trois scénarios dans PHREEQC- version simplifiée

Descriptions		Sous modèle 1	Sous modèle 2	Sous modèle 3
Physique : Q (modèle GR4H_Drain)	Entrée	Pluie N		Qr+ Ql
	Sortie	Ecoulement rapide (Qr)	Ecoulement lent (Ql)	Débit (Qtotal)
Chimique : [C] (Modèle couplée PHREEQC)	Entrée	Pluie ; [C] pluie		Débit nul ; [C] eau de plateforme
	Sortie	Qt ; [C]MD échange avec plateforme	Débit nul ; [C] eau de plateforme	Débit nul ; [C] CD_avant pluie N
Scénario1 et 2	[C] CD_fin de scénario2= [C]matériau drainant (MD) échange avec plateforme + [C] CD_avant pluie N			
Scénario3	[C] CD_fin de scénario3= [C] CD_fin de scénario2 – [CaCO <sub>3</sub> ]↓			

Ces hypothèses reposent sur la très faible perméabilité de la plateforme. Sur ces hypothèses, les représentations des trois scénarios dans PHREEQC sont résumées dans le Tableau 53.

### 9.3.2 Résultats des simulations du modèle couplé

Pour l'ensemble des exploitations menées sur ce modèle, les données d'entrée sont constituées, pour le compartiment chimique, par la composition moyenne de l'eau de pluie, sur la base des analyses réalisées les 08/01/2016, 10/02/2016 et 07/03/2016 (voir chapitre 6, § 6.1.8). Avant l'exploitation de la simulation couplée, certains paramètres physiques, doivent préalablement être calés surtout dans le sous modèle de colonne de sol (matériaux drainant et plateforme) où les valeurs de forçage pCO<sub>2</sub> dissout n'ont pas pu être mesurées.

#### 9.3.2.1 Calage des paramètres physiques du modèle

Le modèle (voir équation 1) comprend trois paramètres physiques : v la vitesse d'advection (m/s), De le coefficient de diffusion effectif,  $\alpha_L$  la dispersait (m), avec  $D_L = D_e + \alpha_L v$  (Press et al., 1992) où D<sub>L</sub> représente le coefficient de diffusion dynamique.

Afin d'estimer les valeurs à retenir, nous nous basons sur le code construction de la ligne (SNCF, 1996a) pour estimer la vitesse d'advection ( $v$ ) à partir d'une perméabilité théorique de matériaux drainants :  $10^{-4}$  m/s. Le coefficient de diffusion ( $D_e$ ) est testé entre  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. La dispersivité ( $\alpha_L$ ) est liée à l'hétérogénéité du sol et varie entre 0.01m et 0.1m pour les sols de sable limoneux (valeur la plus fréquente 0.05m) et entre 0.02m et 0.5m pour les sols marneux limoneux (valeur la plus fréquente 0.2m).

Une première analyse de sensibilité est menée sous forçage chimique et hydraulique constants selon la gamme usuelle de variation des paramètres. Le Tableau 54 présente les valeurs testées pour chacun des paramètres.

Tableau 54 : Les gammes de variation des paramètres physiques utilisés dans

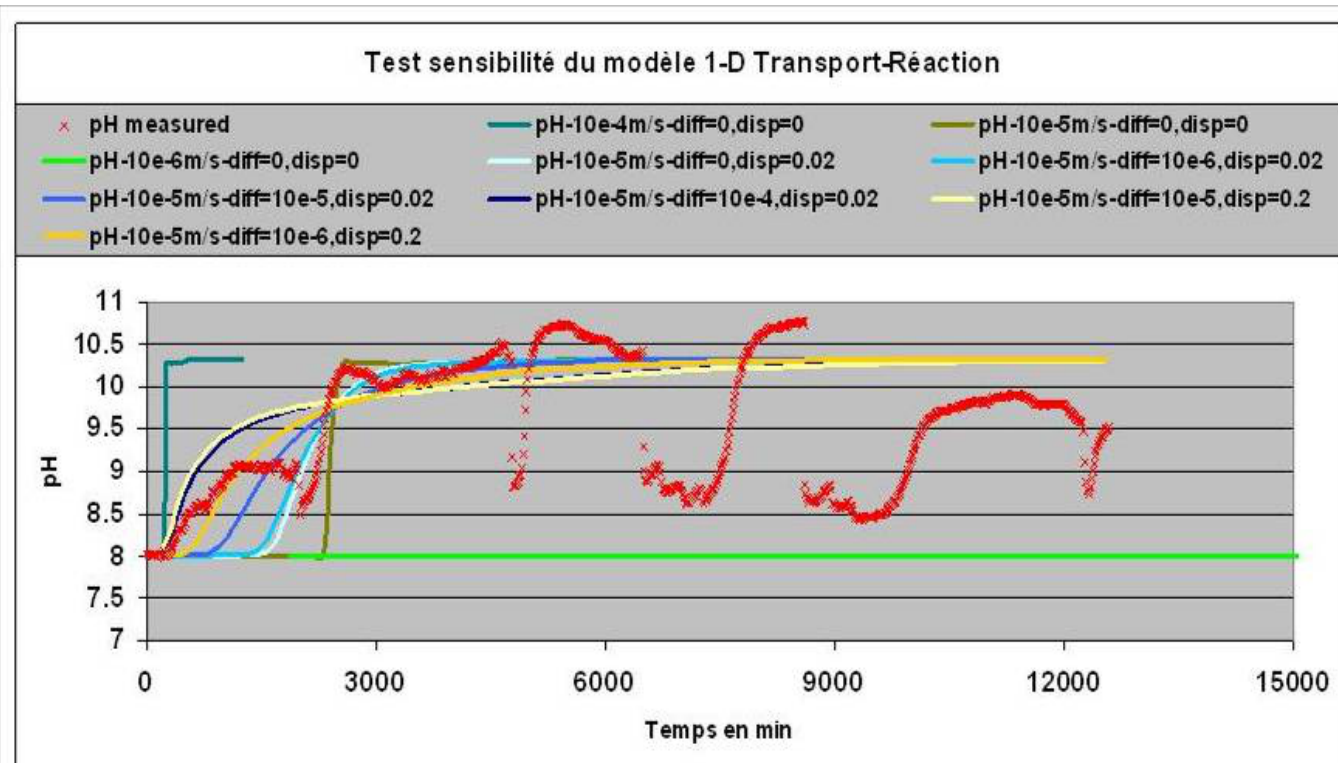
V (m/s)	$D_E$ (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha_L$ (m)
$10^{-4}$	0	0
$10^{-5}$	$10^{-4}$	0.02
$10^{-6}$	$10^{-5}$	0.2
	$10^{-6}$	

Au total 36 simulations ont été effectuées pendant l'épisode pluvieux du 05 au 07 juillet 2014 d'une durée de 2000 minutes. Les résultats des neuf simulations les plus représentatives sont présentés pour le pH dans la Figure 87. Ils permettent d'identifier un jeu de paramètres permettant de suivre correctement l'évolution observée en début d'épisode pluvieux, en se basant sur la comparaison de l'allure des courbes de pH mesuré et simulé.

Sur la Figure 87, on voit que l'advection seule ne peut pas faire évoluer la courbe de pH simulé selon l'allure du pH mesuré. La diffusion est nécessaire à prendre en compte. La grandeur de  $10^{-4}$  et  $10^{-6}$  m/s de la vitesse de l'advection est hors réalité selon l'allure de pH mesuré. La vitesse de l'advection de  $10^{-5}$  m/s est beaucoup plus pertinente.

En sachant que le terrain de Chauconin est un sol marneux limoneux, la dispersivité retenue est à 0.2 m.

En fixant les valeurs de l'advection ( $10^{-5}$  m/s) et de la dispersivité (0.2 m), on observe que la courbe simulée avec un coefficient de diffusion de la grandeur de  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s nous permet de suivre l'allure de montée de la courbe de pH ce que ne permettent pas les valeurs plus faibles. Des valeurs plus élevées de la diffusivité sont peu réalistes. L'ensemble des valeurs retenues pour ces trois paramètres hydriques sont listés dans le Tableau 55.



```

TRANSPORT
-cells 20
-lengths 0.075
#permeabilité 10-4 m/s
-time_step 750
-shifts 100

-flow_direction forward
-boundary_conditions flux flux
-diffusion_coefficient 1.0e-5
-dispersivities 0.2
-correct_disp true
-punch_cells 20

```

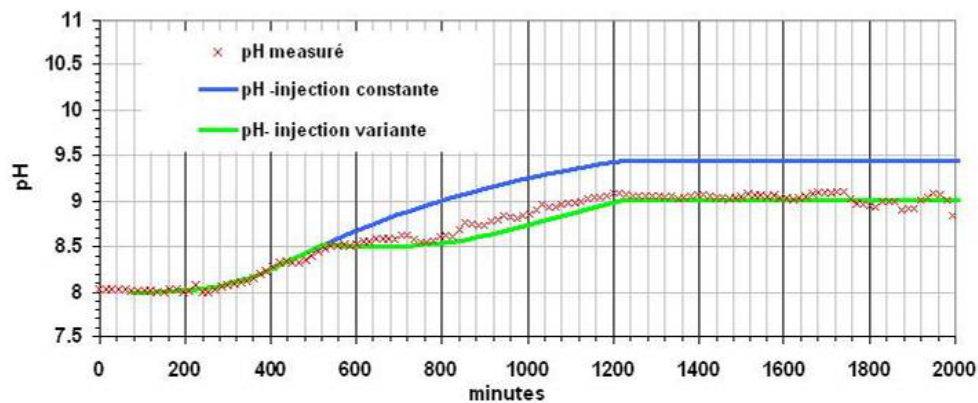
Figure 87: test de sensibilité des paramètres hydrauliques du modèle 1-D transport vis-à-vis de la chimie (pH) sous débit injecté constant

Tableau 55: Valeurs retenues pour les paramètres physiques sur la base de l'analyse de sensibilité

V (m/s)	De (m <sup>2</sup> /s)	α <sub>L</sub> (m)
10-5	10-5	0.2

Le choix des paramètres est confirmé par un second test sous forçage chimique constant et hydraulique variable sur ce même évènement pluvieux du 05 au 07 juillet 2014 d'une durée de 2000 minutes. L'adéquation (Figure 88) simulation – mesure est très satisfaisante.

La Figure 88 permet d'estimer l'influence de la prise en compte des conditions limites hydrauliques variables : la simulation sous l'injection de l'eau en débit constant dans les colonnes de sol produit une surestimation de pH de 0,5 unité par rapport à la simulation sous la pluie réelle.



NB: mode d'entrer la pluie dans 1-D transport de Phreeqc

Pas de temps Δt	1	2	3	4	5	6	totale
Pluie mm tous les Δt	2,54	3,048	0,254	0	0,508	0,254	6,604
ΔPV=K*intensité_moy	0.462PV	0.554PV	0.0462PV	0PV	0.092PV	0.0462PV	1.2PV

Figure 88: test du mode d'entrée des données de pluie du modèle 1-D transport

### 9.3.2.2 Détermination des conditions limites ( $pCO_{2\_dissout}$ ) dans les sous systèmes

En l'absence de mesure en continu de  $pCO_{2\_dissout}$  dans le bassin versant en amont du collecteur drainant : colonne de matériaux drainants (sous système 1) et colonne de la plateforme de la voie de service (sous système 2), il est nécessaire de déterminer une gamme de l'évolution temporelle de la condition limite en  $pCO_2$  dans ces deux sous-systèmes.

En ce qui concerne le sous système 1, il est possible de considérer comme condition limite la  $pCO_2$  de la pluie.

En ce qui concerne le sous-système 2, les estimations effectuées (voir § 9.2 et Figure 80) de  $p\text{CO}_2$  donnent des valeurs largement supérieures à celles de la pluie. Ces valeurs très élevées ne sont pas compatibles avec les processus chimiques pris en compte dans PHREEQC. Il est donc nécessaire de considérer une condition limite de la  $p\text{CO}_2$  différente de la  $p\text{CO}_2$  de la pluie, qui intègre des processus amenant à une augmentation de la  $p\text{CO}_2$  et qui n'ont pas pu être mis en évidence expérimentalement.

Pour déterminer cette condition limite en  $p\text{CO}_2$  dans le sous système 2, nous avons procédé de la manière suivante :

- nous avons considéré l'ensemble des 57 évènements de type « scénario 2 » (période d'écoulement lent avec une remontée du pH et de la conductivité) observés expérimentalement durant la période d'étude ;
- les valeurs moyennes des dates de début et de fin de ces évènements sont prises en compte ;
- sur chacune de ces dates de début et de fin de scénarios, on détermine les valeurs de pH moyen sur l'ensemble des 57 évènements ;
- Sur la base de ces valeurs et de la moyenne de l'alcalinité des 12 campagnes de mesures réalisées, on estime la  $p\text{CO}_{2\_dissout}$  en début et fin de scénario 2 ;
- La condition limite sur la  $p\text{CO}_2$  est définie comme une variation linéaire sur la durée du scénario 2 entre la valeur initiale et la valeur finale de la  $p\text{CO}_2$ .

Bien que la  $p\text{CO}_{2\_dissout}$  soit mesurée dans le CD, sa valeur n'est pas exploitable directement en raison de la précision insuffisante des mesures, ce qui à amené à mettre en place la méthode précédemment décrite.

Pour l'ensemble de ces 57 évènements de type « Scénario 2 », la  $p\text{CO}_{2\_dissout}$  augmente toujours à une valeur supérieure à la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique au début du scénario 2, et puis diminue jusqu'à une très faible valeur à la fin du scénario 2 en accompagnant une remontée de pH de 8 à 11 pendant cette même période. La gamme de la  $p\text{CO}_{2\_dissout}$  estimée du pH et de l'alcalinité mesurée est de  $10^{-0,5}$  atm (valeur maximale en début du scénario 2) à  $10^{-8,5}$  atm (valeur minimale à la fin du scénario 2).

Cette diminution de la  $p\text{CO}_2$  dissout dans l'eau doit être liée à la dissolution du calcaire. Une augmentation de calcium ( $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{scénario 1/2}} < [\text{Ca}^{2+}]_{\text{scénario 3}}$ ) dissout mesurée dans l'eau du CD de 3,82 mM (début scénario 2) à 5,54 mM (fin scénario 2/scénario 3) nous confirme cette dissolution de calcite (annexe 5).

### 9.3.2.3 Réactions chimiques selon les scénarios 1 et 2

Nous présentons les résultats obtenus sur la période du 05/07/2014 au 15/07/2014 qui présente l'ensemble des quatre catégories d'hydrogrammes définies au chapitre 8 (§ 8.2). Une autre période est présentée en annexe 4 du 07/03/2015 au 17/03/2015 pour une période hivernale.

Dans la simulation des scénarios 1 (écoulement rapide) et 2 (écoulement lent) par le modèle couplé, les caractéristiques des trois sous modèles sont les suivantes :

#### a) Sous modèle 1- matériaux drainants

20 cellules d'épaisseur 0.075 m qui représentent l'épaisseur du matériau drainant sur le site de Chauconin : 1,5 m au total;

Le pas de temps nécessaire pour remplacer le volume d'eau interstitielle dans chaque cellule est fixé à 750 secondes pour représenter une vitesse d'advection lors de la traversée du matériau drainant de  $10^{-4}$  m/s (temps de transit = 4.17 h en moyenne, égale 15 000s);

L'eau injectée dans la colonne de matériaux provient du ruissellement de la plateforme avec les caractéristiques chimiques initiales suivantes : pH 8 et pCO<sub>2</sub> à 400 ppm ;

#### b) Sous modèle 2- plateforme ferroviaire

20 cellules d'épaisseur 0.075 m qui représentent l'épaisseur du matériau de la plateforme au dessus de l'entrée de CD sur le site de Chauconin, soit 1,5 m au total dont 13 cellules sont remplies de matériaux de sous- couche et couche de forme (phases minérales essentielles : calcite - gypse); et 7 remplies de matériaux drainants (calcite essentiellement).

Le pas de temps de remplacement du volume d'eau interstitielle est fixé à 7500 secondes pour représenter une vitesse d'advection estimée dans le matériau de la plateforme à  $10^{-5}$  m/s (temps de transit = 41.7 h en moyenne, égale 150 000s).

L'eau injectée dans la colonne de matériaux de plateforme provient de l'eau de la pluie qui a les caractéristiques chimiques initiales suivantes : pH 8 et pCO<sub>2</sub> basée sur la méthode présentée précédemment ;

#### c) Sous modèle 3- CD

Une unique cellule sans écoulement est prise en compte. Trois processus s'y produisent :



- mélange des trois eaux (eau sortant des matériaux drainant, de la plateforme et l'eau du départ de CD) ;
- formation de la calcite (équilibre thermodynamique et cinétique) ;
- évaporation d'eau (cinétique).

L'eau en sortie de la colonne de matériaux drainants mélangée avec l'eau sortant de la plateforme avec leurs fractions de débits estimées par le modèle de GR4H\_Drain, rejoint l'eau initialement présente dans le CD qui a les caractéristiques chimiques initiales suivantes (échantillon dans le CD avant la pluie le 02/06/2014) :

- S1 (amont du CD) : pH 7,9, T°C de 17,8 °C, [Ca<sup>2+</sup>] de 5,73 mM, alcalinité carbonatée de 0,722 mM et sulfate de 5.94 mM ;
- S9 (aval du CD) : pH 10, T°C de 13.9°C, [Ca<sup>2+</sup>] de 5,49 mM, alcalinité carbonatée de 0,183 mM et sulfate de 5.9 mM ;

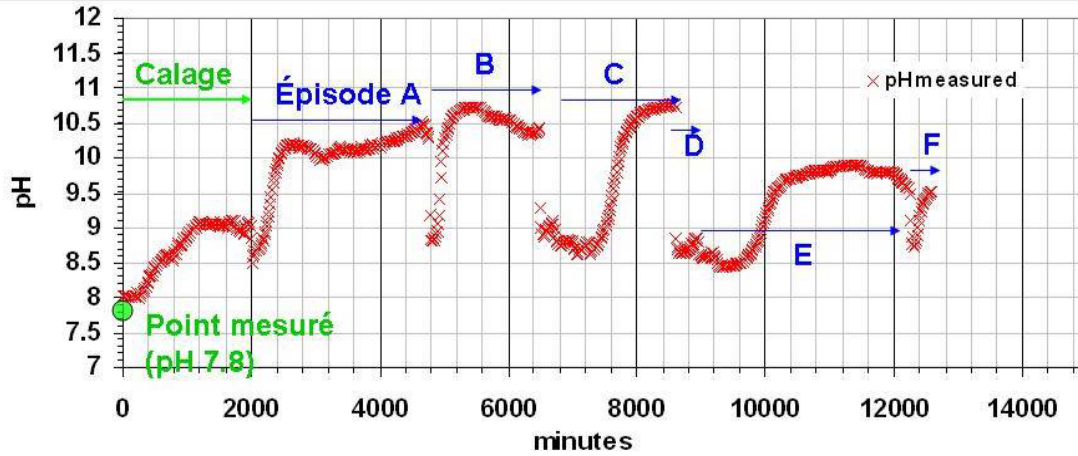
La série de pluies du 05/07/2014 au 15/07/2014 (14000 minutes au total) comprend une succession de scénarios 1 et scénario 2, exclusivement.

#### 1) Simulation du scénario 1

Le résultat de 6 simulations de scénario 1 (pH chute sous écoulement rapide) est illustré dans la Figure 89 (épisode A, B, C, D, E et F). Ces simulations sont basées sur les hypothèses de conditions initiales du modèle décrites dans le

Tableau 50. Pour les différentes séquences du scénario 1 les résultats des simulations sont en bon accord avec les mesures de pH.

D'après ces simulations, on trouve 3 scénarios pour lesquels la pCO<sub>2</sub> de l'air renseignée est beaucoup plus grande (de 10<sup>-0.85</sup> à 10<sup>-2.7</sup> atm, Figure 89) que celle de notre hypothèse initiale de 10<sup>-3.4</sup> atm (valeur dans l'air atmosphérique). Cependant, en considérant les valeurs de pH et d'alcalinité mesurées dans l'eau de la plateforme (P1) respectivement de pH 6 et 2.84 mM pour l'alcalinité, la valeur de la pCO<sub>2</sub> dissout est estimée à 10<sup>-0.93</sup> atm, ce qui est très proche de la valeur maximale (10<sup>-0.85</sup> atm) précitée. Cette observation souligne qu'il y a un apport de CO<sub>2</sub> dissout issu de la plateforme dès le scénario 1 (période d'écoulement rapide).



- pH measured
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-2.0$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-4.2$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-3.4$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-3.4$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-2.7$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-0.85$  atm
- pH simu- $P_{CO_2} 10e-4.0$  atm

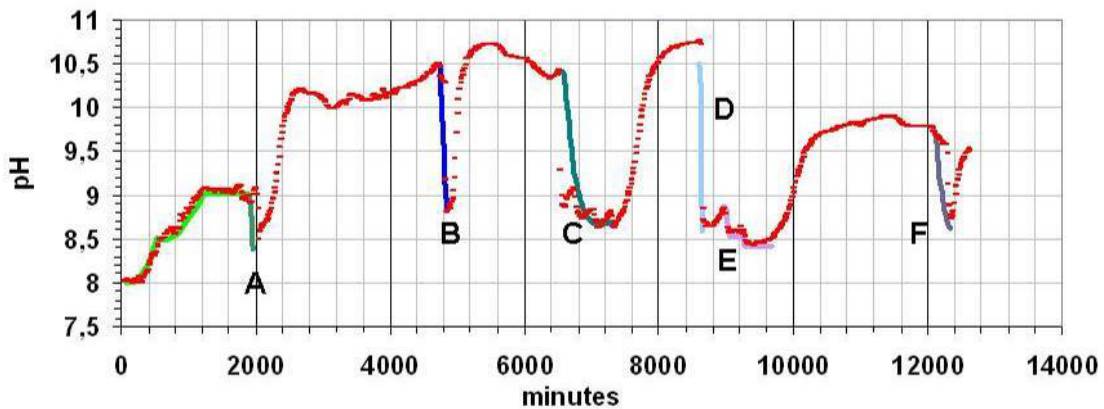


Figure 89: pH simulation des cas de scénario1- pH chute dans l'écoulement rapide

Ces résultats relatifs à la chimie de l'eau confirment encore une fois notre hypothèse de départ: la chimie de l'eau du CD vient d'un mélange des écoulements rapides et lents dont les fractions de débit ont été calculées à partir de GR4H\_drain. En fait, d'après GR4H\_drain, lors d'une succession d'évènements pluvieux, l'écoulement lent de la pluie précédente existe dès le début de l'écoulement rapide d'une nouvelle pluie et contribue à la composition chimique de l'eau dans le CD.

## 2) Simulation du scénario 2

D'après l'analyse des variables et des conditions initiales dans chaque sous modèle, on sait qu'il y a une seule variable de forçage à considérer (la  $p\text{CO}_2_{\text{dissout}}$  de l'eau de la plateforme,

Tableau 50) dans le scénario 2, lors de l'écoulement lent de la plateforme. La méthode utilisée pour estimer la  $p\text{CO}_2$  en entrée a été présentée précédemment.

Le résultat des simulations de différents épisodes de scénario 2 (remontée du pH pendant l'écoulement lent) est présenté Figure 90 (a : sans ajustement de la  $p\text{CO}_2$  pendant la simulation ; b : avec ajustement de la  $p\text{CO}_2$  – variation de  $p\text{CO}_2$  entre  $10^{-8}$  et  $10^{-6.5}$  atm.). On voit que dans les simulations avec ajustement (<10% en ppm) de la  $p\text{CO}_2$ , la courbe de pH simulé s'ajuste bien au pH mesuré dans l'eau du CD pendant le scénario 2 (de la minute 1950 à la minute 4750). Les oscillations dans la courbe mesurée, qui sont simulées correctement, sont donc imputables à de faibles variations de la  $p\text{CO}_2$  dans la plate-forme. Les faibles diminutions de 0.5 pH sont un signe de la formation de calcite (0.1 mM par 0.5 unité pH) d'après le calcul des équilibres thermodynamiques.

Bien que notre modèle conceptuel ne prenne pas en considération la couche de sol traité, celle-ci, dans laquelle de la chaux vive est présente (1%) pourrait éventuellement interagir avec la sous-couche et la couche de forme prises en compte, en raison en particulier de l'hétérogénéité spatiale de l'interface sous-couche – couche traitée et de l'apport accidentel de chaux dans la sous-couche. Pour percoler 1 cm de sol traité avec une perméabilité de la même valeur que la couche de forme (10<sup>-7</sup>m/s), il ne faut que 1,2 j. l'écoulement lent pouvant durer 2 à 3j, il est donc possible qu'il permette la dissolution de la chaux favorisant un pH élevé dans le CD même après la pluie.

Sur la base du même principe de simulation, quatre autres simulations en écoulement lent (scénario 2) sont présentées Figure 91 (entre t = 4800 minutes et t = 12600 minutes).

Sur l'ensemble des six scénarios 2 (A à F, dans Figure 91), la  $p\text{CO}_2_{\text{dissout}}$  en conditions limites du bassin versant en amont est toujours ajustée à une valeur très faible (<10<sup>-5</sup> atm = 10ppm). Ici, on rappelle qu'en l'absence de mesure en continu du calcium, on utilise seulement deux variables d'état de l'eau du CD : le pH et la C25. . Dans ce modèle conceptuel, elles sont simulées via l'ajustement de deux conditions limites (la  $p\text{CO}_2$  et la présence de carbonates). Etant donné que les compositions des matériaux encaissants sont calcaires (chapitre 6, § 6.1.3), on considère que dans notre simulation, cette condition limite du volume de calcaire est illimitée. Sa

dissolution au travers des écoulements rapide et lent est uniquement conditionnée par la  $p\text{CO}_2$  dissout dans l'eau dans les colonnes de sol.

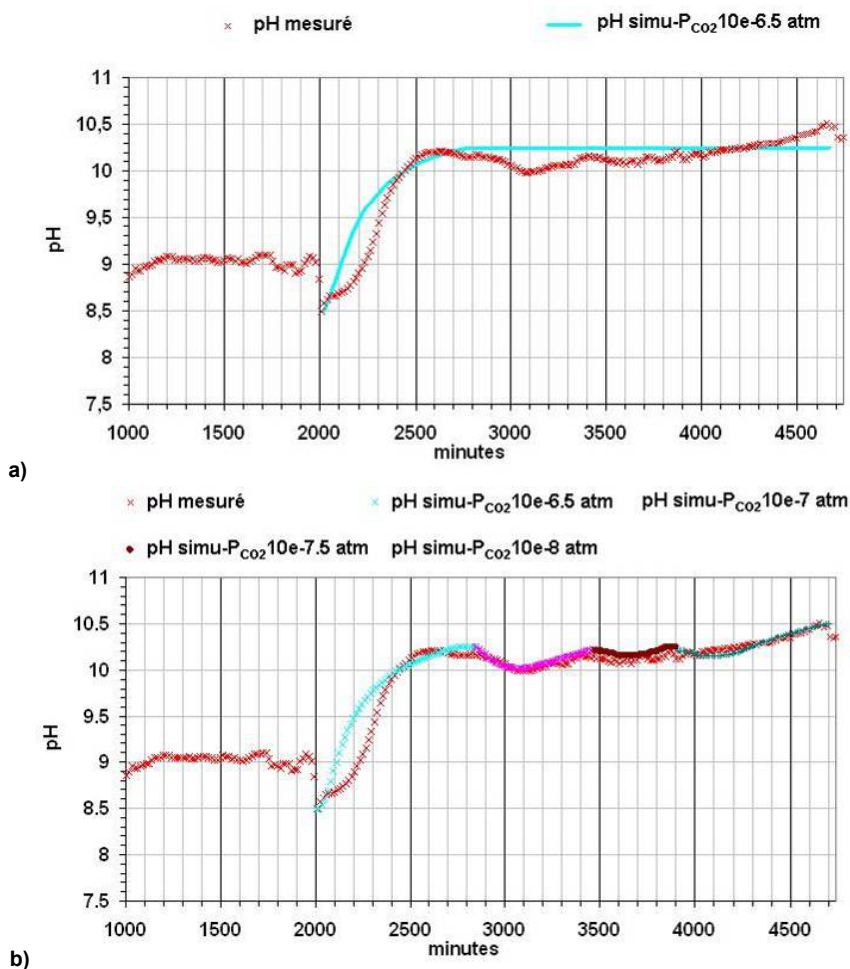


Figure 90: pH simulation selon scénario2 –pH remonté sous l'écoulement lent  
NB : a) sans ajustement de  $\text{PCO}_2$  ; b) avec ajustement de  $\text{PCO}_2$

### 3) Synthèse des simulations des scénarios 1 et 2

Sur l'ensemble des 6 simulations de scénarios 1, la  $p\text{CO}_2$  dissout simulée en sortie du matériau drainant est supérieure ou égale à 10-3,4 atm (valeur à l'équilibre avec la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique, en milieu ouvert) ce qui correspond aux conditions limites déterminées sur le bassin versant en amont.

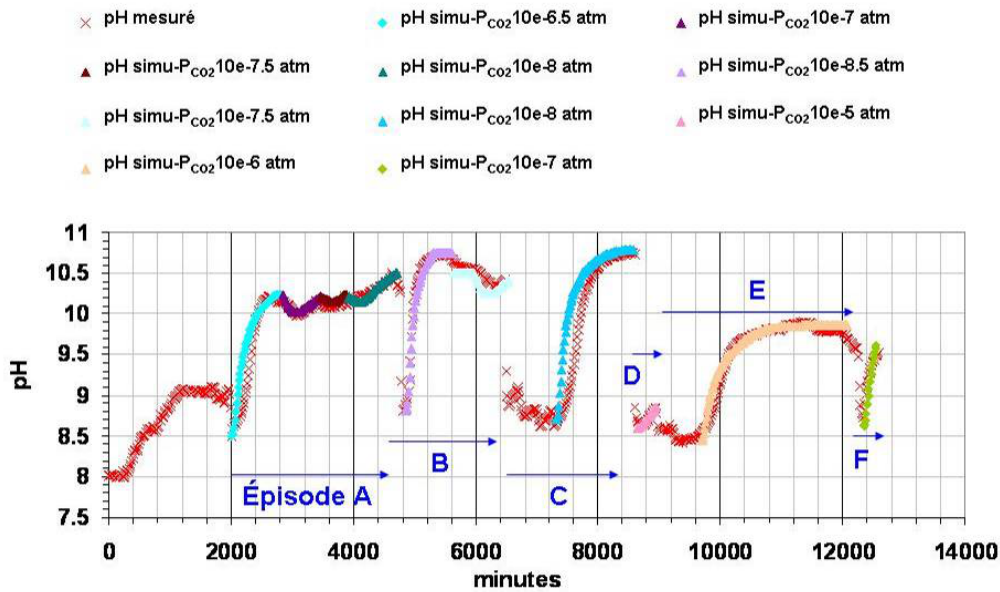


Figure 91: simulation de l'évolution du pH selon cinq types de scénarios 2

Pour l'ensemble des simulations de scénarios 2 (écoulement lent), la  $p_{CO_2\_dissout}$  simulée à la fin est quasiment nulle ( $<10^{-5}$  atm = 10 ppm). Cela peut être lié à deux choses :

- la présence d'une source d' $OH^-$  (possiblement liée à la chaux présentée dans le sol traité). Cet apport d' $OH^-$  conduit à un changement de la  $p_{CO_2\_dissout}$  dans le CD entre le scénario 1 (écoulement rapide à travers le matériau drainant) et 2 (écoulement lent à travers la plateforme). Cet apport d' $OH^-$  peut être aussi la raison pour la quelle l'eau du CD se maintient à un pH supérieur à 9 pendant plusieurs jours tout au long du CD après la pluie.
- Ce pH aussi élevé à la fin du scénario 2 peut être le résultat de la formation de la calcite. Dans ces conditions de pH élevé, tout le  $CO_2$  dissout dans l'eau du CD se transforme en carbonates ce qui favorise la formation de calcite.

En résumé, sur la base des réactions de dissolution-précipitation de la calcite et du gypse présents dans la plateforme, et en intégrant les processus physiques, le volume d'eau de la pluie (scénario 1) et la  $p_{CO_2}$  dans l'eau de la plateforme (scénario 2) sont deux variables de forçage.

Durant le scénario 1, sous écoulement rapide, le processus essentiel qui se produit est l'acidification de l'eau du CD, par l'apport de carbone sous forme de  $CO_2$  dissout (scénario 1). Ceci est illustré par la chute de pH à pH8 au niveau du CD, puis par le rééquilibre du  $CO_2$  dissout, de l'hydrogénocarbonate et du carbonate. Cet apport de  $CO_2$  dissout favorise la dissolution des calcites constitutives du matériau drainant.

### 9.3.2.4 Réactions chimiques selon le Scénario 3

Le scénario 3 est simulé dans un réservoir bien mélangé, sans écoulement et seules les cinétiques des processus de précipitation et dissolution de la calcite, de l'évaporation sont prises en compte. La simulation de la chimie de l'eau du CD (pH) est faite sur la période du 13/06/2014 au 29/06/2014, une grande période de temps sec de 15 jours. Pendant cette simulation, le CD est considéré comme un système fermé aux sources calcaire mais ouvert à la  $p\text{CO}_2$  atmosphérique. Les résultats de la simulation sont donnés dans la Figure 92.

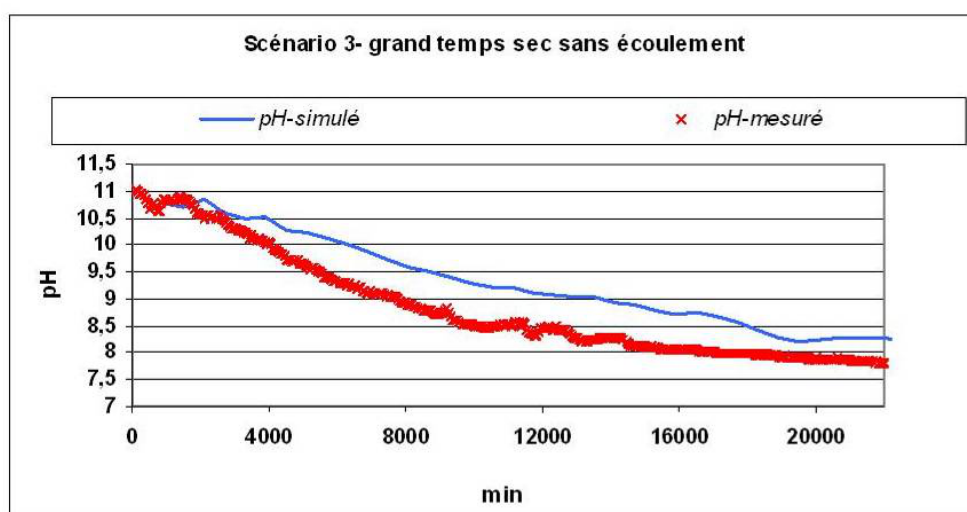


Figure 92: pH simulé – donnée du 13/06/2014 to 29/06/2014 –scénario 3

Le pH simulé montre la même tendance que le pH mesuré. Les deux baissent progressivement jusqu'à une stabilisation vers pH 8. C'est un indice de la formation de la calcite via l'hydrolyse d'hydrogénocarbonate. Un écart maximum de 0,5 pH (écart de 6%) entre la courbe simulée et la courbe mesurée est observé. Cet écart est faible, la simulation est donc considérée comme pertinente, et fiable pour l'estimation de la quantité de calcite précipitée par temps sec.

## 9.4 Quantité de calcite précipitée

### 9.4.1 Dynamique de $[\text{Ca}^{2+}]$ simulée et formation de calcite selon les scénarios 1 et 2

a) Dynamique de l'évolution de la concentration de calcium, carbone et sulfure

Sur la base des simulations précédentes, il est possible de suivre les concentrations simulées des trois ions essentiels : calcium, sulfates et alcalinité carbonatée pendant les scénarios 1 et 2 (Figure 93). Les résultats de conductivité simulée (Figure 93a) sont liés à la pondération des concentrations en fonction des débits rapides et lents. La Figure 93b illustre l'évolution des 3 espèces essentielles, Ca, S, C simulées au cours de l'évolution de la conductivité. . Sachant que :

- la courbe de Ca-simulé est une somme de  $[Ca^{2+}] + [CaHCO_3^+] + [CaOH^-] + [CaCO_3]$  ;
- la courbe de S(6)- simulé est une somme de  $[SO_4^{2-}] + [HSO_4^-] + [CaHSO_4^+] + [CaSO_4]$  ;
- la courbe de (C(4))- simulé est une somme de  $[CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [CaHCO_3^-] + [CaCO_3]$ .

Comme les autres ions majeurs ont une concentration très faible dans l'eau (< 1 mM), et ne participent pas aux réactions du système calco-carbonique, on peut les ignorer.

Nous travaillons toujours sur l'épisode du 08/07/2014 (données de la minute 1575 à la minute 1750). La forme de la courbe de conductivité simulée (chute selon scénario 1 et remontée selon scénario 2) suit la tendance de la conductivité mesurée avec la même amplitude. Cet accord confirme la modélisation conceptuelle du système mise en place et la dépendance de la composition chimique de l'eau du CD aux écoulements rapides et lents.

Un écart maximum de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  est observé entre la C25 simulée et la C25 mesurée pendant le scénario 2 où l'apport de calcium dissout est essentiel. Cette surestimation est produite parce que la conductivité simulée est estimée à partir de la concentration de Ca-simulé, S(6)- simulé et C(4)- simulé au lieu de la concentration ionique de calcium, carbonates et sulfates.

Il apparait que : l'apport de carbone se produit tout au long du scénario 1 et 2, c'est-à-dire que les matériaux drainants et les matériaux de la plateforme ont tous joué un rôle de source de carbone. Cette observation est cohérente avec les résultats du § 9.2. L'apport de calcium vient essentiellement du scénario 2 qui produit de la dissolution de gypse et cet apport est lié à celui du sulfate.

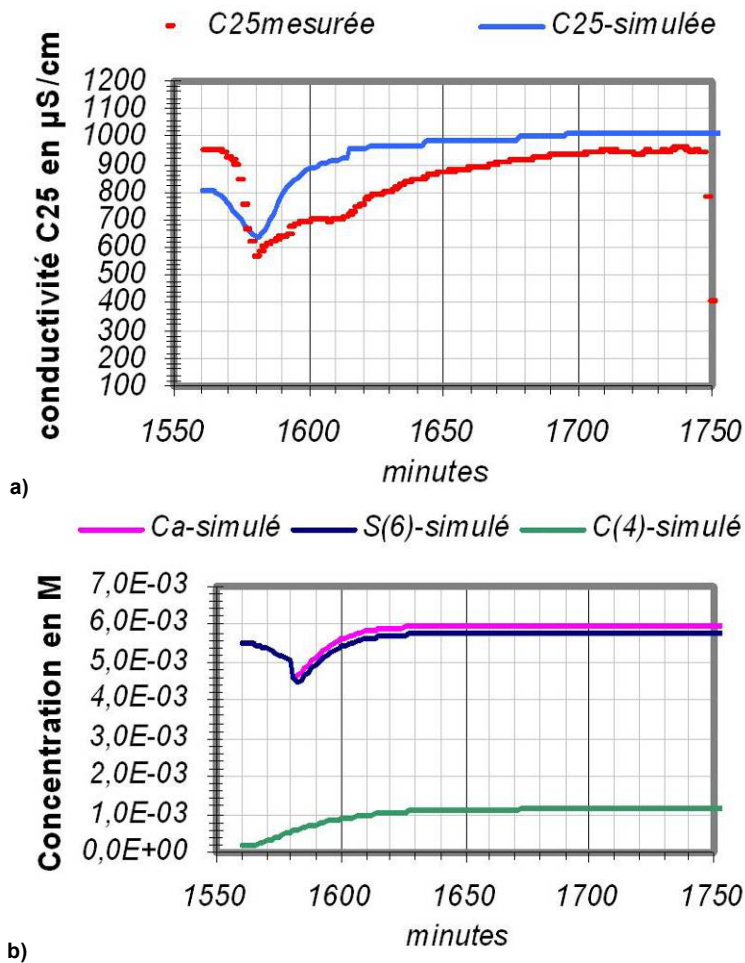


Figure 93: exploitation du Ca – C – S dans l'eau du CD selon les scénarios 1 et 2

b) Formation de la calcite selon les scénarios 1 et 2 – bilan de calcium

Tableau 56: Bilan de calcium selon scénario 1 et 2 – donnée de 1550 à 1750 minutes

<i>Processus</i>	<i>Ca mM</i>	<i>Matériaux</i>	<i>dissout/précipité</i>
<i>Scénario1</i>	<i>0.4</i>	<i>calcaire</i>	<i>dissout</i>
<i>Scénario2</i>	<i>0.32</i>	<i>gypse</i>	<i>dissout</i>
<i>Scénario1+2</i>	<i>0.52</i>	<i>calcite</i>	<i>précipité</i>
<i>Fin</i>	<i>0.2</i>		<i>dissout</i>

Sur la base des résultats de la simulation de l'évolution de calcium, de sulfate et de carbonates illustrée Figure 93, on établit un bilan de calcium dans le Tableau 56 afin d'illustrer quantitativement le processus de la formation selon les scénarios 1 et 2.



A la fin de cette simulation dynamique, PHREEQC indique qu'il y a 23 g de CO<sub>2</sub> dégazé pendant que 1,06 m<sup>3</sup> d'eau s'est infiltrée vers le collecteur drainant (CD). C'est-à-dire qu'il y a 0,52 mole (égale 23/44) de calcite formée dans 1,06 m<sup>3</sup>. En résumé, pendant cet épisode pluvieux, la précipitation de la calcite est de 0.49 mM (égale 0,52/\*1060).

En vérifiant sur les autres cinq épisodes entre le 05/07/2014 et 15/07/2014, la concentration moyenne de la calcite précipitée lors d'un épisode représentatif est de 0.67 mM (égale 67mg/l = 67g/m<sup>3</sup>). En prenant en compte le volume total sur un an d'eau de la pluie effective drainée par le CD (somme de 57 épisodes : 270 mm sur 8600 m<sup>2</sup> de bassin versant égale 2322m<sup>3</sup>), la quantité de la calcite précipitée annuelle est estimée à environ 156 kg (égale 67\*2322/1000).

Cette estimation est validée par les résultats obtenus par protocole spécifique de mesure de la calcite précipitée in situ sur lame de verre. D'après ces mesures réalisées entre février 2015 et janvier 2016, la cinétique de précipitation est de 2\*10<sup>-8</sup> mmol.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> en moyenne (voir annexe 4). A partir de l'équation suivante, on peut estimer la quantité annuelle de calcite précipitée dans l'ensemble du CD :

$$[\text{Calcite}_{\text{précipitée}}] = 2 * 10^{-8} * [\text{surface mouillée}] * [\text{temps}]$$

Avec :

- La surface mouillée du CD exprimée en cm<sup>2</sup>, et calculée par la hauteur d'eau en (cm), le diamètre de CD (40 cm) et la longueur de CD (800 m) ;
- le temps exprimé en secondes, (un an, soit 31 536 000s) ;
- le [volume d'eau\_CD] exprimé en litres, calculé par [surface mouillée]\* [longueur\_CD]/10, et la [longueur\_CD] est de 800 m ;
- la [Calcite<sub>précipitée</sub>] exprimée en mmol, et [Calcite<sub>précipitée</sub>] \* [volume d'eau\_CD]/10000 en Kg.

A partir de cette équation, on peut estimer la quantité de calcite précipitée par an en fonction de la hauteur d'eau dans les 800 m de CD, ce qu'illustre la Figure 94.

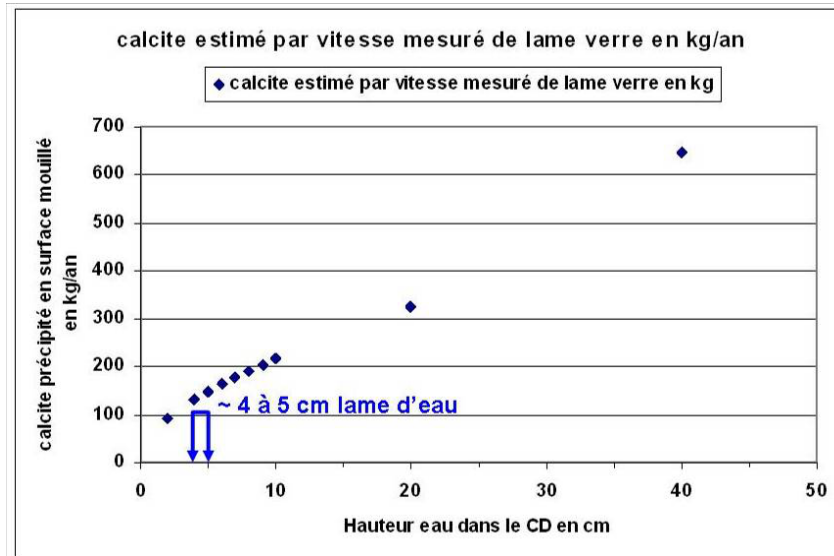


Figure 94: estimation de la quantité de la calcite précipité dans l'année par la mesure de lame en verre

On voit que pour un niveau d'eau de 4 à 5 cm dans le collecteur qui correspond au niveau d'eau moyen annuel mesuré, la quantité de calcite précipitée est estimée entre 133 kg et 149 kg. Ces valeurs annuelles sont très proches de celles estimées par la simulation de PHREEQC (156 Kg) avec un écart entre 4,7% (156/149 - 1) et 17% (156/133 - 1).

#### 9.4.2 Dynamique de $[Ca^{2+}]$ simulé et formation de calcite selon le scénario 3

On exploite les résultats de la simulation de l'évolution de calcium, de carbone et de sulfate dissout dans l'eau selon le scénario 3 dans la Figure 95. On sait que selon ce scénario, le pH a diminué progressivement de 11 à 8 (Figure 92). Cette diminution de pH est liée à la précipitation de la calcite. La diminution de la concentration du calcium simulée confirme cette précipitation de calcite. La concentration précipitée est estimée à 0.3 mM  $CaCO_3$  d'après un calcul de thermodynamique de l'eau du CD à l'équilibre avec la  $pCO_2$  atmosphérique à 20 °C (température de l'eau du CD) et à 35 °C (température de l'air du CD).

Au cours de ce scénario les concentrations de sulfate et de carbonate augmentent : de 0.4 et 0.8 mM respectivement. Cette augmentation se traduit par une augmentation de +13 % de la concentration initiale en ces ions. L'augmentation de la concentration en sulfates (S(6)) qui ne participent pas à la précipitation de la calcite est interprétée comme un indicateur de l'évaporation interne au CD.

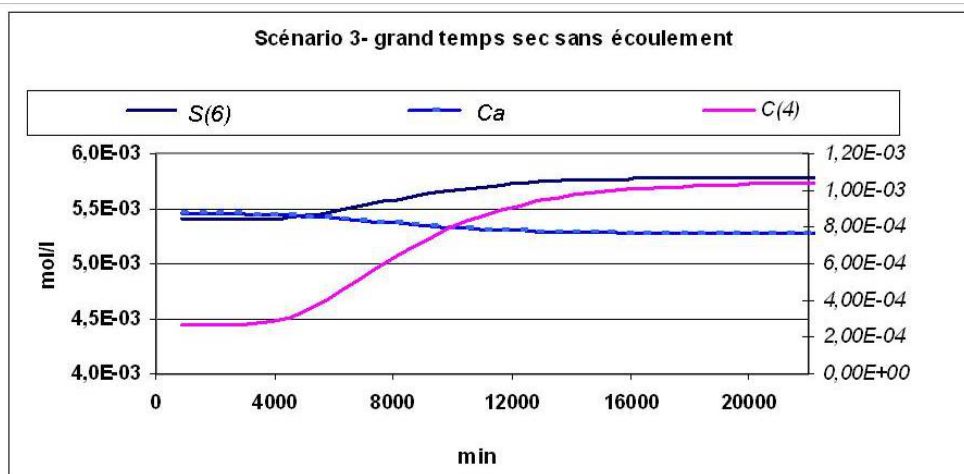


Figure 95: Ca, S(6) et C(4) simulé – données du 13/06/2014 to 29/06/2014 –scénario 3

Ici, pour mieux comprendre le processus, on établit un bilan de calcium et carbone pendant cette période de scénario 3 (sans l'écoulement, calcite précipitée, eau vaporisée) dans le Tableau 57.

L'évaporation cause une augmentation de la concentration de carbone de 0,23 mM. Les 1,27 mM (0.8-0.23+0,7) restantes correspondent à un apport de pCO<sub>2</sub> atmosphérique à l'équilibre. Un calcul thermodynamique de PHREEQC montre qu'à pH 8 à la fin de ce scénario où l'eau du CD s'équilibre avec pCO<sub>2</sub> atmosphérique, il y a 1.2 mM (v.s. 1,27 mM estimé du bilan) de CO<sub>2</sub> dissout dans l'eau. Cette cohérence (1.2 mM v.s. 1,27 mM) de l'estimation de l'apport de carbone de l'air vers l'eau pour l'équilibre du système confirme l'ensemble des hypothèses du modèle.

Par ailleurs, l'augmentation de la concentration de sulfate et de carbonates simulées doit conduire à une augmentation de la conductivité de l'eau du CD de 190 µS/cm (150 µS/cm en moyenne selon les données de l'acquisition in situ). L'écart est de 13%, donc on peut considérer que l'augmentation de la conductivité est le fait de l'évaporation et de l'apport de CO<sub>2</sub>.

Le phénomène de grand temps sec est un phénomène mineur sur le site de Chauconin. Pendant deux ans d'acquisition en continue, on ne capte que trois scénarios de grand temps sec (sans écoulement).

En termes d'estimation de la quantité annuelle de la calcite précipitée, nous recommandons d'utiliser la méthode de la Figure 94 .

Tableau 57: Bilan de calcium selon scénario 3 – donnée du 13/06/2014 au 29/06/2014

Effets sous scénario3	Ca mM	C mM	S mM
Evaporation	0.4	0.23	0.4
Précipitation	0.7	0.7	
Adsorption CO <sub>2</sub> atmosphérique		1.27	
Fin	0.3	0.8	0.4
Sens	diminue	augmente	augmente

## 9.5 Epilogue du chapitre

En conclusion de ce chapitre, nous sommes parvenus à estimer le pH et la conductivité (C25 : somme de [Ca], [C] et [S]) pour trois scénarios correspondants aux trois fonctionnements différents du système : écoulement rapide, lent et nul dans un modèle conceptuel de simulation implémenté dans PHREEQC. Ce modèle conceptuel est un modèle couplé des données de sols, du fonctionnement hydrodynamique (calculé dans modèle GR4H\_Drain) et du fonctionnement chimique du système de CD. Ce modèle couplé peut être adapté à d'autres cas ferroviaires comme les collecteurs drainant en LGV et les drainages de tunnels pour prévoir le risque de formation de la calcite. Il peut aussi être simplifié pour développer un outil plus facile à utiliser dans des applications opérationnelles.

Dans la dernière partie de ce manuscrit, la conception d'un outil d'aide à la décision (Chapitre 10) incluant ce modèle conceptuel sera présentée. Auparavant la détermination des paramètres nécessaires à la mise en place de cet outil, pour chacun des sites flash étudiés dans ce travail de recherche sera effectuée (Chapitre 10) et complétée par une analyse comparative permettant de mettre en place une catégorisation des sites, qu'ils aient faits l'objet d'un suivi dense (site pilote de Chauconin) ou d'un suivi léger ponctuel (sites flashes). Cet outil d'aide à la décision a pour objectif de prédire le risque de formation de calcite dans un système de drainage en conception et, pour des sites existants, d'optimiser la maintenance en proposant des traitements physiques ou chimiques adaptés selon le contexte du terrain.



## **Chapitre10 Application opérationnelle – Outil d'aide à la décision**

Les mécanismes de l'entartrage des divers dispositifs de drainage dans l'infrastructure ferroviaire constituent une problématique complexe dont les facteurs aggravants varient selon le contexte et les spécificités de ces systèmes. Partant de ce constat, il est aisé d'imaginer que l'efficacité d'une solution de traitement soit largement dépendante des conditions de site. Nos résultats préliminaires font pressentir que la transposition d'un site à l'autre d'une même solution ne garantit pas la réduction de l'effort de maintenance, à moins de conditions environnementales proches.

Surtout, ce qui fait la particularité d'un site c'est : sa géologie (minéralogie, faciès chimique), son hydrologie (physico-chimie), son environnement ferroviaire (profil en long, matériaux rapportés, système de drainage).

Autrement dit, il semble peu réaliste de standardiser une solution de traitement unique qu'il soit préventif ou curatif.

Les travaux présentés ici ont permis de mieux comprendre les mécanismes induits dans le contexte ferroviaire et d'identifier des pistes qui peuvent permettre de :

- évaluer le risque d'entartrage des sites (en phase étude) ;
- quantifier les dépôts dans des cas similaires à celui de Chauconin;
- évaluer la pertinence d'une solution technique de traitement.

### **10.1 Facteurs soulignés et leurs valeurs de seuil**

D'après la comparaison des sites selon divers paramètres nous soulignons 3 facteurs chimiques :

- la dureté de l'eau ;
- la pCO<sub>2</sub> dissout (ou l'alcalinité carbonatée et le pH) ;
- L'indice de saturation (SI= log  $\Omega$ ).

Dans les régions où l'eau de source est très dure (>150 mg/l en CaCO<sub>3</sub>), le carbonate de calcium est le principal composant du tartre dans les réseaux d'eau

potable (Yang et al., 2001; Legrand and Leroy, 1995). Ce phénomène problématique est également constaté dans les dispositifs de drainage d'infrastructure routière (Meriaux et al., 2013) et ferroviaire (Jia et al., 2014; Malhèrbe, 2001a). Il existe beaucoup d'études menées dans des contextes de tunnels en France (Agaud and Faure, 2014) et à l'étranger (Dietzel et al., 2013, 2008, 1992; Rinder et al., 2013; Yee et al., 2012; Girmscheid et al., 2003a, 2003b).

Peu d'études traitent de la problématique des dispositifs ferroviaires de pleine voie (Conso, 2013a; Jia, 2012; Maraghni, 2011; Malhèrbe, 2001a) ce sur quoi nous avons axé une grande partie de ce travail.

Pour une nappe à surface libre, la  $pCO_2$  dissout est de l'ordre de 103 à 4 ppm. Par contre, pour la pluie infiltrée dans la zone non saturée (profondeur <10m), la valeur de la  $pCO_2$  dissout est proche de celle dans l'atmosphère.

La SI de la calcite est souvent entre 0 à 1 pour l'eau de la nappe de la surface libre, mais peut être supérieure à 1 pour l'eau d'infiltration de la pluie en dans une zone non saturée mais riche de calcium.

En s'appuyant sur les résultats obtenus sur le site pilote de Chauconin, et les sites flash et en tenant compte de l'état de l'art actuel sur les techniques de traitement du calcaire nous proposons 3 pistes de solutions opérationnelles pour réduire le risque de colmatage dans les réseaux de drainage des plateformes ferroviaire :

- Réduction des risques par le choix des matériaux rapportés de plateforme ;
- Optimisation des dispositifs de drainage afin d'adapter à l'hydrogéologie locale ;
- Adaption des techniques de traitement des dépôts carbonatés en fonction de la nature et de la texture des dépôts évalués en fonction du contexte du site et de la géométrie des dispositifs.

Ce chapitre est ciblé à discuter des techniques ou méthodes exploitables dans l'infrastructure ferroviaire en fonction du contexte du site et des dispositifs mis en service.

## **10.2 Outil d'aide à la décision**

Afin de donner des pistes d'amélioration pour la gestion du risque d'entartrage sous l'angle industriel nous avons imaginé une démarche d'aide à la décision qui

pourrait être déclinée sous forme d'un outil dont on présente ici la forme conceptuelle. Cet outil s'inscrirait dans la démarche de :

- prédiction du risque d'entartrage en phase conceptuelle (conception et régénération de lignes) ;
- proposition de guide en phase maintenance pour le traitement en fonction des cas rencontrés;

Le principe de cet outil s'appuie sur la simulation thermodynamique et cinétique de la formation de calcite d'un dispositif de drainage ferroviaire dans des conditions de site connues. L'ensemble des informations descriptives et quantitatives relatives au contexte environnemental du site et aux dispositifs de drainage (géométrie, eau et dépôt) sont stockés dans une base de données. Elle contient 5 rubriques liées à trois fonctions à trois niveaux d'utilisation (Figure 96).

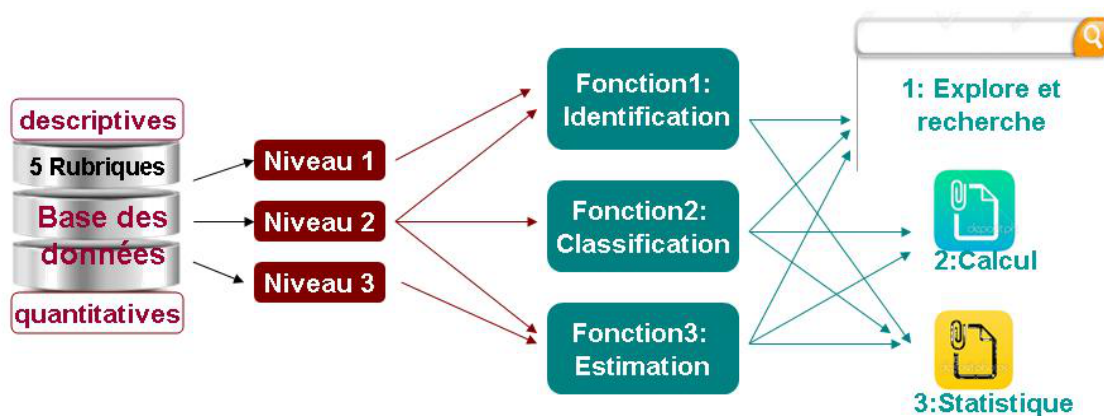


Figure 96: Principe conceptuel de l'outil d'aide à la décision pour la réduction de l'entartrage

Les trois fonctions principales de cet outil sont:

- Identification : l'outil explore les données de caractérisation d'un cas existant contenu dans la base de données, préenregistré par des informations et calculs servant à identifier, classifier ou estimer ce cas;
- Classification : dans le cas d'un nouveau site d'étude, cette fonction permet selon le degré de précision des informations fournies sur le contexte du site, de quantifier le risque/taux d'entartrage soit par un calcul, ou de comparer statistiquement le cas avec des cas similaires contenus dans la base de données ;



- L'estimation d'un cas afin de proposer un ensemble de solutions préventives ou curatives selon le résultat du calcul et statistiques; l'analyse des limites opérationnelles du terrain vis-à-vis une solution proposée.

### 10.2.1 Structure de l'outil

Cet outil se compose de trois parties (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**): A- un moteur de recherche, B- une base de données et C- des résultats de sortie d'outil.

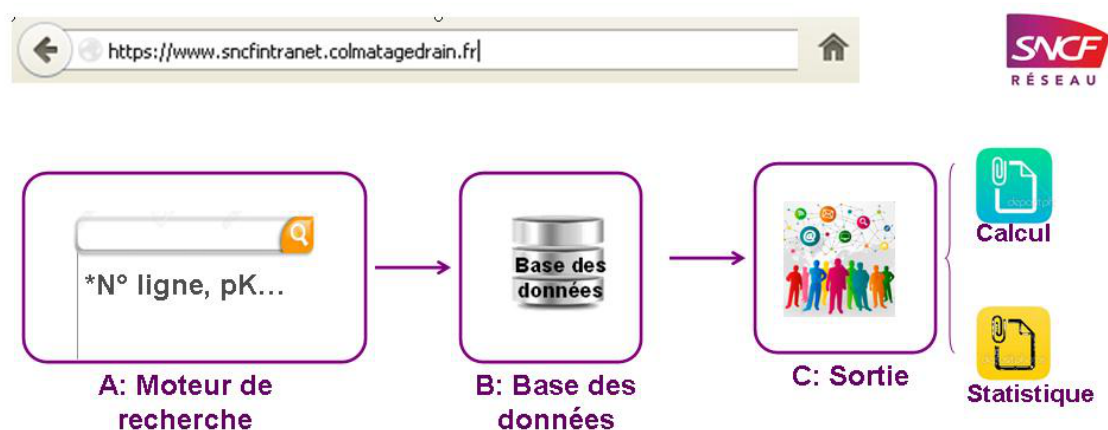


Figure 97: Structure conceptuelle de l'outil d'aide à la décision

#### A) Interface de saisie

A1. Moteur de recherche - Module de saisie des identifiants du site/ Module d'accès au contenu ;

La saisie porte sur un site existant dans la base de données à rechercher pour les informations qu'il contient.

A2. Formulaire de renseignement de la base de données ;

La saisie porte sur un site à étudier pour lequel il est nécessaire de trouver des solutions opérationnelles.

Nota : on prévoit en optionnel un espace de stockage pour les dossiers complexes dont les données n'ont pas encore été extraites et exploitées.

## B) Base de données

L'outil contient une base de données réalimentée à chaque nouveau cas étudié :

- des sites connus sur le RFN pour présenter une problématique de colmatage avec leurs caractéristiques et étudiés spécifiquement;
- des sites issus de la bibliographie pour leurs similitudes.

Elle est structurée en trois niveaux ordonnés et pondérés selon l'algorithme proposé comme suit :

Niveau 1 : Localisation du site et informations générales ;

Niveau 2 : Contexte environnemental et ferroviaire.

Il s'agit des données de description de la géologie, de l'hydrologie, des caractéristiques de l'ouvrage étudié (nature et géométrie du drain etc.).

Ces données sont ordonnées et pondérées dans le but de comparer avec les cas déjà enregistrés pour identifier ou chercher le cas le plus proche ; par exemple, pour deux cas similaires, que la géologie, les matériaux rapportés et le dispositif de drainage soient comparables.

Niveau 3 : Données physico-chimiques (eau et phases minérales) du site (suite à campagne de terrain et analyses de laboratoire) serviront aux calculs hydrogéochimiques, thermodynamiques et cinétiques.

## C) Module de résultat

La Figure 99 illustre le principe du module de résultat de l'outil, détaillé ci-après.

### C1) Solution statistique

Un premier module de solution permet, en fonction des informations saisies dans le moteur de recherche, la proposition d'exemples similaires que ce soit sous l'angle technique (ie. Résultat de calcul de la quantité de calcite formée), économique (budget et limites du terrain). Il est proposé de limiter les propositions aux 5 cas les plus proches du cas étudié.

### C2) Solution issue de calculs hydrogéochimiques

Un deuxième module permet la réalisation de calculs hydrogéochimiques (simulation thermodynamique et cinétique faite à partir de l'analyse d'eau) pour approfondir la connaissance du site. Les calculs sont réalisés à partir de l'appel d'un

logiciel dédié. Les données d'entrées qui pourraient éventuellement manquer sont au besoin complétées par celles issues d'un regroupement statistique (C1).

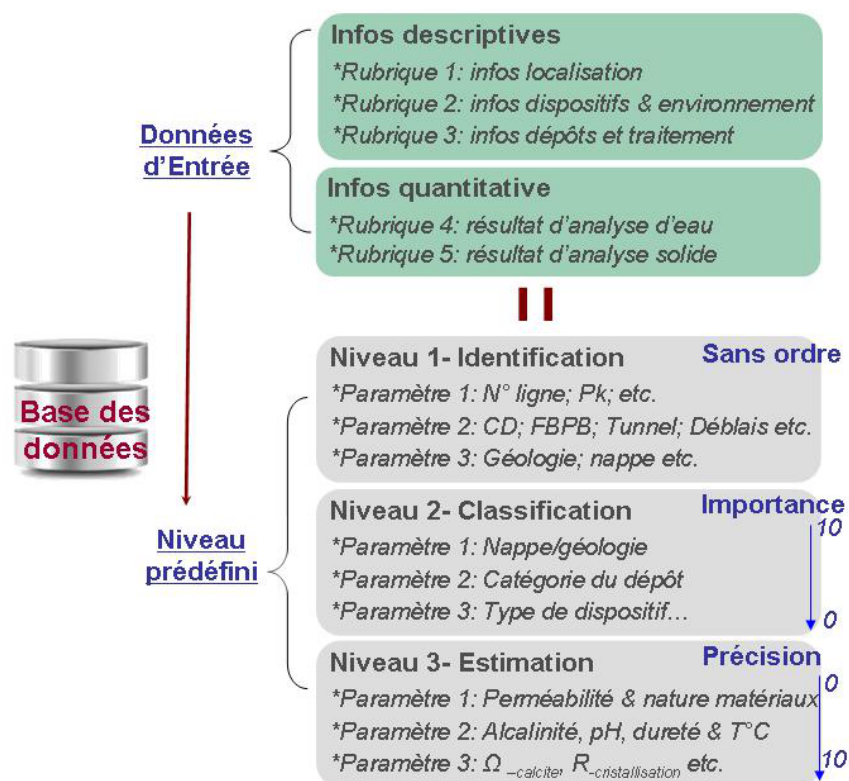


Figure 98: Structure et contenu de la base de donnée de l'outil d'aide à la décision

L'outil donne 5 applications exploitables fonctionnant comme un référentiel pour la validation d'un choix de techniques de traitement de l'entartrage : prévention pour le cas « Standard » pour lequel ses informations essentielles (chimie d'eau et type de drainage) sont connus; pour les cas non-standard, une étude d'expertise spécifique avec analyses supplémentaires est mise en place. La base de données enregistre itérativement les nouveaux cas simulés qui alimentent le référentiel afin d'améliorer la performance de l'outil. Ce niveau d'étude nous permet de justifier et d'optimiser une solution de maintenance quantitativement à partir de l'analyse de cas existants.

## 10.3 Identification des cas comparables à Chauconin et solutions associées

Nous proposons de décrire plus précisément le contenu de l'outil et de ses composants à partir du cas réel de Chauconin dont les paramètres étudiés constituent le socle de la base de données de cet outil.

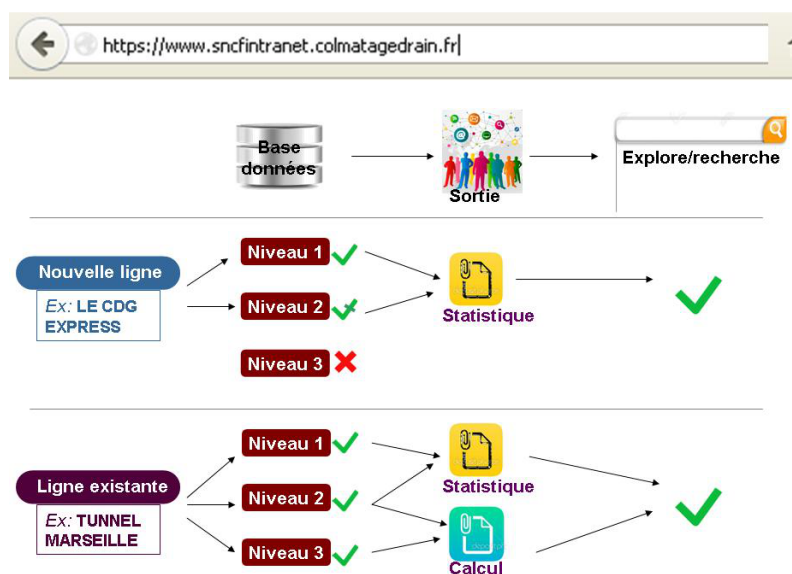


Figure 99: Principes du module de résultat de l'outil d'aide à la décision

### 10.3.1 Contenu et structure de la base de données

Les caractéristiques prises en compte dans le moteur de la base de données décrivent les paramètres en jeu dans le principal processus menant au colmatage des dispositifs. Une base de données standard s'appuierait sur les cinq rubriques de paramètres suivants :

Rubrique 1 (IG) : Informations Générales du site - donnée de niveau 1 et 3 ;

Rubrique 2 (CDDE) : Caractéristiques des Dispositifs de Drainage et leur Environnement – donnée de niveau 2 ;

Rubrique 3 (EDCT) : Etat du Dispositif vis-à-vis du colmatage et informations générale du Colmatage et Traitement – donnée de niveau 2 ;

Rubrique 4 (CPCE) : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau – donnée de niveau 3;

Rubrique 5 (NPMD) : Nature des Phases Minérales du sol, des matériaux rapportés et des Dépôts – donnée de niveau 3.

Ici on rappelle les paramètres principaux retenus de l'étude de site pilote (Chauconin) avec leurs valeurs et critères pour une montre d'exemple de répartir les ensembles des informations dans les 5 rubriques de base de données prédéfinies dans l'outil :

1) Dissolution progressive des matériaux constituants (gypse-calcite-dolomite) de la plateforme par percolation de l'eau de pluie/et ou de nappe ( $\sim 10^{-7}$  m/s), menant à une augmentation de l'infiltration lente (environ 22% vs. 15% en construction de la ligne). On retient les paramètres de Rubrique 1 et 4 ;

2) Chargement progressif de l'eau drainée et évacuée vers le CD devenant très dure (TH > 150 °f) au fur et à mesure de son parcours dans la plateforme; Ici, dans ces informations, on retient des paramètres de Rubrique 4 ;

3) Transfert rapide de l'eau à travers les matériaux drainants perméables ( $\sim 10^{-4}$  m/s vers le CD lors d'un événement pluvieux efficace ( $\Sigma$ pluie  $\geq 2$ mm ; durée  $\leq 3$ h) mais saturée de CO<sub>2</sub> ; on retient des paramètres de Rubrique 1 et 4 ;

4) Mélange de ces deux eaux dans le collecteur drainant conduisant à une précipitation rapide ( $\Omega$  médiane >10 ; pH médiane >9) de la calcite sous forme de poudre dans le CD. Formation de « stalactites » aux niveaux des fentes constatées et assumées sous l'effet des gouttes d'eau et de l'évaporation apparues dans la période du débit lent après la pluie ; Ici, dans ces informations, on retient des paramètres de Rubrique 4 et 5;

5) Pas de contribution de la nappe régionale sur la précipitation de la calcite dans le CD. Ici, dans ces informations, on retient des paramètres de Rubrique 4.

Ensuite, on voit dans les paragraphes suivants les détails d'une base de données standard avec leur fiche d'entrées des données prédéfinies (Tableau 58 à Tableau 62, classés ensemble à la fin de §10.2) dans cet outil.

### **10.3.2 Détails et exemples de fiche standard d'entrées des données**

1) Rubrique 1- Informations générales du site

Dix paramètres ont été définis dans cette rubrique (Tableau 58) dont 2 à caractère obligatoire (indicateur O) et 8 en générale (indicateur G).

- Le type de ligne, de voie (indicateur G),
- la perméabilité des terrains (données quantitatives : indicateur Q), le type de travaux de terrassement (déblais/remblais...), l'emplacement du dispositif de drainage sont les paramètres caractéristiques qui nous permettent d'exploiter (indicateur E), classier (indicateur C) et estimer/quantifier la problématique du colmatage du CD.

Application :

- les informations de l'indicateur G (générale) et C (classement) sont les critères d'identification et de classification servent à la recherche de cas spécifiques ou similaires via le moteur de recherche.
- Les paramètres de l'indicateur O (Obligatoire) et Q (quantitative) entrant en jeu d'exploitation dans l'estimation de la quantification qui servent à la validation d'une proposition de solution opérationnelle au niveau technique ou budgétaire.

## 2) Rubrique 2- Caractéristiques des dispositifs de drainage et de leur environnement

Cette rubrique concerne les informations relatives aux caractéristiques géométriques des dispositifs de drainage. Huit paramètres ont été définis dans cette rubrique (Tableau 59) dont 5 à caractère obligatoire (indicateur O) et 3 en générale (indicateur G).

- le type, la nature, et le couvercle de dispositif de drainage (indicateur GC) ;
- La géométrie de dispositif de drainage et la pluie annuelle du site (indicateur OECQ) ;
- La nature de matériaux drainant, la géologie du site et le type de nappe présente (indicateur OEC).

Application :

- les informations de l'indicateur GC sont toujours utilisés pour explorer la recherche d'un cas dans la base de données ;

- Les informations de l'indicateur OECQ nous permettent de supposer un modèle hydrochimique pour le cas d'étude.

Par exemple, dans le cas de Chauconin, en résumant les informations de la rubrique 1 et 2, on sait qu'il y a un CD (DN400, pente 3mm/m) en PEHD posé en entre voie dalle et ballast. Il draine une nappe perchée dans la plateforme rapportée (composée de Gypse-dolomite-calcaire) et traitée à la chaux ainsi que la pluie via les matériaux drainant en calcaire. D'où, on choisit un modèle hydrochimique (1-D transport) basé sur 2 colonnes de perméabilité et matériaux différents.

### 3) Rubrique 3- Etat du Dispositif vis-à-vis du colmatage et Information générale des Colmatage et traitement

Cette rubrique concerne les informations relatives aux caractéristiques des dépôts et le traitement actuel (technique et le coût). Huit paramètres ont été définis dans cette rubrique (Tableau 60) dont 2 à caractère obligatoire (indicateur O) et 6 en générale (indicateur G).

- PK (Point kilométrage) initial et PK fin (l'indicateur G) ;
- La nature et résistance, la zone de dépôts privilégiés, la forme et la texture du dépôt, le type de traitement (l'indicateur GCE) ;
- La fréquence et le prix unitaire de traitement utilisé (l'indicateur OECQ).

Application :

- les informations de l'indicateur G servent à la recherche et l'explorer d'un cas ;
- les informations de l'indicateur GCE servent à pré-estimer une solution de traitement via l'algorithme statistique;
- les informations de l'indicateur OECQ servent à optimiser une proposition de solutions opérationnelles via le calcul budgétaire et la vérification de l'efficacité de traitement.

Ex : dans le cas de Chauconin, où la calcite se dépose sous la forme d'une poudre (molle) au niveau des fentes et au fond du CD dans des zones de changement de pente, d'une chute d'eau à la sortie de l'exutoire et de raccordement en angle, le choix de l'hydrocurage couplé à une inspection vidéo tous les 10 ans est suffisant.

#### 4) Rubrique 4- Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

Les informations contenues dans cette rubrique concernent les analyses réalisées sur les échantillons d'eau issues des dispositifs de drainage et de leur environnement (pluie et nappe). Six paramètres ont été définis dans cette rubrique (Tableau 61) dont 3 à caractère obligatoire (indicateur O) et 3 généraux (indicateur G).

- La date d'échantillonnage, le type de d'eau et la conductivité de l'eau (l'indicateur GCE) ;
- Le pH, la température (T°C), et les données de thermodynamique et cinétique de l'eau (l'indicateur OECQ).

Application :

- Les informations de l'indicateur GCE servent à la recherche et au classement des cas similaires dans la base de données ;
- Les informations de l'indicateur OECQ servent à quantifier la calcite précipitée dans le dispositif de drainage étudié.

Par exemple : à partir du calcul du degré de saturation ( $\Omega$ ) on peut déterminer si la précipitation sera plutôt hétérogène (avec traceur, i.e. quartz etc.) et rapide ( $\Omega >10$ ) ou homogène et lente ( $\Omega <10$ ). Cela permet d'estimer la vitesse de cristallisation par l'équation de model PWP (Plummer et al. 1978) afin d'optimiser la fréquence de traitement nécessaire.

#### 5) Rubrique 5 – Nature des phases minérales de sols, de matériaux rapportés et des dépôts

Cette rubrique complémentaire (coût élevé d'analyse) concerne les informations relatives à la nature des phases minérales du sol en place, des matériaux rapportés en phase des dépôts carbonatés. Sept paramètres ont été définis dans cette rubrique (Tableau 62) dont six à caractère obligatoire (indicateur O) et un général (indicateur G).

- Le type de matériaux ou sol testé (l'indicateur GCE) ;



- Les phases minérales identifiées par Rayon- X, la formule chimique, le pourcentage de masse, la taille de cristalline de cette phase minérale, le pH et la conductivité de la solution de sol in situ/rapporté/traitées (l'indicateur OECQ).

Application :

- Les informations de l'indicateur GCE servent à pré-choisir les processus chimiques dans la modélisation hydrogéochimique basée sur la configuration et contexte du site et le système de drainage.
- Les informations de l'indicateur OECQ servent à prévoir le risque de la formation de calcite via le calcul du degré de la saturation de la calcite, et aussi servent à prédire la forme et la vitesse du dépôt du colmatage afin de modifier la conception.

Tableau 58 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 1 – Cas de Chauconin

Paramètres	N° ligne	Pk initial	Pk fin	Perméabilité m/s	Secteur	Type ligne	Type voie	Emplacement du drain	Nombre trains/j	Année
Liste des choix ou rempli à la main	...	...	...	$<10^{-7}$	Déblais (D)	TGV	Dalle en béton	Pied déblais	...	...
				$10^{-6}$ à $10^{-7}$	Remblais (R)	LC	Ballast	Remblais		
				$10^{-5}$ à $10^{-6}$	R – rapporté - LP	...	...	Entre voie		
				$10^{-4}$ à $10^{-5}$	CDF rapporté - CGDC			...		
				$>10^{-4}$	PL traitée à chaux					
				...	D-R alterné					
					Tunnel					
					Gare					
					Autres					
Indicateurs	G	G	G	O	O	C	C	C	G	G

NB : G - général ; O- Obligatoire ; E- exploitation ; C-Classification ; Q- quantification ; PL – plateforme ; CDF- couche de forme, CGDC-composants de Gypse-Dolomite-Calcite ; LP – limons purge ; LT- limons traités

Tableau 59 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 2 – cas de Chauconin

Paramètres	Type drain	Nature	Géométrie		Couvercle	Matériaux drainant	Géologie < 10 m profond	Type de nappe drainée	Pluie annulle mm
Liste des choix ou rempli à la main	CD	Béton	Pente (mm/m)	3	Fermé métallique	Inconnu	argile	Non nappe	0-100
				20					
				...					
	Fossé pièdroit	PVC	Profondeur (m) sous point P	1,5	A ciel	Calcaire	limons	Nappe calcaire	100-300
				...					
	FBPB	PEHD	Diamètre CD (DN mm)	400	Grille métallique	Gypse	calcaire	Nappe perchée PL -CGDC	300-500
				500					
				...					
	FTR	Fibre-ciment	Diamètre barbacanes (mm)	...	Béton avec fente	Hors calcaire et gypse	...	Nappe sable	500-700
	FT	...	Section fossé		...	...	...	...	>700
...	...	Distance regard		...	...	...	...	...	
...	...	...		...	...	...	...	...	
Indicateurs	GC	GC	OECQ		GC	OEC	OEC	OEC	OECQ
NB : G - général ; O- Obligatoire ; E- exploitation ; C-Classification ; Q- quantification ; PL – plateforme ; CDF- couche de forme, CGDC-composants de Gypse-Dolomite-Calcite ; LP – limons purge ; LT- limons traités									

Tableau 60 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 3 – cas de Chauconin

Paramètres	Pk initial	Pk fin	Nature et résistance du dépôt		Endroit privilège	Forme ou texture	Type Traitement (TM)	Fréquence TM	Prix TM k€/ an / km		
Liste des choix ou rempli à la main	...	...	calcite	D	2mm-Fentes	Stalagmite	Hydro curage	mensuel	25		
				M							
			gypse	D	SP- Plastique	Stalactite	Hydro curage+ vidéo	saisonnier	35		
				M							
			ferreux	D	SP- Béton	Bloc cimenté	Acide	6 mois	45		
				M							
			Fines du sol locale	D	SP- brique	Bille/ sphérique	Inhibiteur inorganique	Annuel	55		
				M							
			Inconnu	D	SP-moellon	Tuf/ barrage	Inhibiteur organique	2 ans	65		
				M							
			...				Changement pente	Escalier/ terrasse	Micro-bienne	5 ans	...
							Chute d'eau				
RD- à l'angle	...	...									
...	...	...									
Indicateurs	G	G	GCE		GCE	GCE	GCE	OECQ	OECQ		

NB : G - général ; O- Obligatoire ; E- exploitation ; C-Classification ; Q- quantification ; PL – plateforme ; CDF- couche de forme, CGDC-composants de Gypse-Dolomite-Calcite ; LP – limons purge ; LT- limons traités

Tableau 61 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 4 – cas de Chauconin

Paramètres	Type Eau	Date d'analyse	pH	T °C	C25 µS/cm	Données de la thermodynamique (ionique en 10 <sup>-3</sup> M) et la cinétique (minéral mmol/cm <sup>2</sup> /s)										
						Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TAC	etc.	mM/ cm <sup>2</sup> /s
Listes de paramètres choisies	CD	...	6	4	<400	<1	<0,1	...	...	...	...	...	<1	<0,1	...	<10 <sup>-10</sup>
	FBPB		6,5	6	600	2	0,2						2	0,2		10 <sup>-9</sup>
	FTR /FT		7	8	800	3	0,5						3	0,5		10 <sup>-8</sup>
	Pluie		7,5	10	1000	4	1						4	1		10 <sup>-7</sup>
	Npe-L		8	12	1200	5	1,5						5	1,5		10 <sup>-6</sup>
	Npe-P		8,5	14	1400	6	2						6	2		10 <sup>-5</sup>
	Npe-C		>9	>16	>1600	>7	>2,5						>7	>2,5		>10 <sup>-4</sup>
	...		...	...	...	...	...	...					...	...		...
Indicateurs	GCE	GCE	OECQ	OECQ	GCE	OECQ										

NB : G - général ; O- Obligatoire ; E- exploitation ; C-Classification ; Q- quantification ; Npe- Nappe ; PL – plateforme ; CDF- couche de forme, CGDC-composants de Gypse-Dolomite-Calcite ; LP – limons purge ; LT- limons traités

Tableau 62 : Paramètres prédéfinis pour la fiche ID – Rubrique 5 – cas de Chauconin

Paramètres	Matériaux testé	Phase minérale (DRX)	Formulaire	Masse en %	pH	C25 μS/cm	Taille cristalline (μm)
Listes de paramètres retenus	Sol	Illite					
	Dépôt	Quartz	SiO <sub>2</sub>	<7%	~8	~ 250	
	plateforme	Calcite	CaCO <sub>3</sub>	~93%			
	Matériaux drainant	Gypse	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O				
	...	...	...	...			...
Indicateurs	GCE	OECQ	OECQ	OECQ	OECQ	OECQ	OECQ
NB : G - général ; O- Obligatoire ; E- exploitation ; C-Classification ; Q- quantification ; Npe- Nappe ; PL – plateforme ; CDF- couche de forme, CGDC-composants de Gypse-Dolomite-Calcite ; LP – limons purge ; LT- limons traités							

# Conclusion générale

Ce travail de recherche avait pour objectif de rechercher l'origine du colmatage des dispositifs de drainage des voies ferrées en particulier dans les collecteurs drainants le long des LGV.

Si certains de ces facteurs sont bien identifiés et assez faciles à traiter, (végétation, fines, ballast, objets exogènes), d'autres se traduisent par l'apparition fréquente de dépôts minéraux de formes, couleurs, textures, consistance variables, impliquant une maintenance exigeante et onéreuse à l'échelle du RFN. Cette thèse s'est focalisée sur l'analyse des causes et processus liée à l'apparition de ces minéraux.

Pour cela une double approche au plan mesure et modélisation a été mise en place sur un site exploité de LGV, Chauconin. Une expérimentation durant deux ans a été menée couplant analyse des processus physiques, hydrologiques et physico-chimiques. L'ensemble des résultats obtenus a fait l'objet d'une modélisation couplée des phénomènes.

Cette expérimentation a été enrichie par l'étude de sites complémentaires couvrant une variété importante de configurations et de dispositifs de drainage.

Les résultats obtenus ont montré que la composition des dépôts est quasiment exclusivement du carbonate de calcium sous forme de calcite uniquement. Ces dépôts s'apparentent au phénomène de précipitation de calcite rencontrés fréquemment dans les milieux carbonatés naturels et dans les systèmes industriels (entartrage de réseaux sous pression).

Les résultats obtenus mettent en évidence que le contexte ferroviaire est un système assez complexe mêlant des matériaux d'origine et des matériaux rapportés, naturels ou traités. Il s'en suit des interactions physico-chimiques en présence d'eau qui amènent à un entartrage particulièrement rapide comme cela a été mesuré. Elle devient significative à l'échelle d'une dizaine de jours.

S'il apparaît que la présence de calcaire comme matériau drainant n'influence pas la précipitation à l'intérieur du système de drainage, par contre, il apparaît nettement que c'est l'infiltration à l'intérieur de la plateforme qui est à l'origine de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'eau amenant à la précipitation dans le collecteur drainant.

La présence constatée de gypse dans les matériaux rapportés du site pilote est un facteur aggravant de précipitation qui pose la question d'une nécessaire caractérisation chimique au-delà de leur performance mécanique des matériaux avant leur homologation.

Le constat du fonctionnement du système de drainage comme étant celui d'un système ouvert ne permet pas d'envisager un épuisement ou un ralentissement du phénomène de précipitation. Dans la mesure du possible on préférera privilégier les systèmes superficiels pour limiter l'apparition des dépôts.

Dans les configurations où un système superficiel n'est pas envisageable, il importe de s'assurer de l'homogénéité de la mise en œuvre de la plateforme et de la qualité de celle-ci, afin de réduire autant que possible le risque d'infiltration d'eau météorique.

Une liste d'indicateurs a été proposée ainsi qu'un premier outil d'aide à la décision qui peuvent être utilisés à la fois pour l'évaluation du risque de précipitation dans les projets de conception et de régénération et caractériser les zones de maintenance prioritaire. Pour cela il est proposé d'introduire la notion de diagnostic du « risque calcite » dans les référentiels de conception.

A partir de ces paramètres il est possible d'estimer la quantité annuelle de précipitation cumulée dans les dispositifs et donc d'adapter la planification des opérations de maintenance.

Les solutions curatives aujourd'hui restent très onéreuses et d'une efficacité dans le temps soit moyenne soit réduite dans le temps, elles peuvent même contribuer à dégrader l'infrastructure.

Il importe de chercher à faire évoluer ses solutions et les résultats de la thèse constituent une base solide et incontournable pour cela.



# Bibliographie

Aagaard, P., and Helgeson, H.C. (1982). Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions; I, Theoretical considerations. *Am. J. Sci.* **282**, 237–285.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Khamis, E., and Abd-El-Khaled, D.E. (2008). Investigation of fig leaf extract as a novel environmentally friendly antiscalent for CaCO<sub>3</sub> calcareous deposits. *Desalination* **230** 314–328.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Khamis, E., and Abd-El-Khalek, D.E. (2011). A natural extract as scale and corrosion inhibitor for steel surface in brine solution. *Desalination* **278**, 337–342.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Khamis, E., Abd-El-Rhmann, H., Aglan, H., and Ludwick, A. (2012). Green Anti - scalent for Cooling Water Systems. *Int J Electrochem Sci* **7** 11930–11940.

Adamczyk, K., Prémont-Schwarz, M., Pines, D., Pines, E., and Nibbering, E.T.J. (2009). Real-Time Observation of Carbonic Acid Formation in Aqueous Solution. *Science* **326**, 1690–1694.

AFNOR, 2003 NF EN 13450 - Granulats pour ballasts de voies ferrees.

Agaud, J., and Faure, A. (2014). CPE - Problème de calcite tunnel de Marseille (Ecole supérieur de chimie physique électronique de Lyon).

Akin, B., Öner, M., Bayram, Y., and Demadis, K.D. (2008). Effects of Carboxylate-Modified, "Green" Inulin Biopolymers on the Crystal Growth of Calcium Oxalate. *ResearchGate* **8**, 1997–2005.

Alias, J. (1984) La voie ferree - Techniques de construction et d'entretien. SNCF, EYROLLES.

Amjad, Z., and Demadis, K.D. (2015). *Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches* (Elsevier).

Andritsos, N., Kontopoulou, M., Karabelas, A.J., and Koutsoukos, P.G. (1996). Calcium carbonate deposit formation under isothermal conditions. *Can. J. Chem. Eng.* **74**, 911–919.

Appelo, C.A.J., and Postma, D. (2004). *Geochemistry, Groundwater and Pollution, Second Edition* (CRC Press).

Araizi, P.K., Hills, C.D., Maries, A., Gunning, P.J., and Wray, D.S. (2016). Enhancement of accelerated carbonation of alkaline waste residues by ultrasound. *Waste Manag.* **50**, 121–129.

Arvidson, R.S., and Luttge, A. (2010). Mineral dissolution kinetics as a function of distance from equilibrium – New experimental results. *Chem. Geol.* **269**, 79–88.

Arvidson, R.S., and Mackenzie, F.T. (1997). Tentative kinetic model for dolomite precipitation rate and its application to dolomite distribution. *Aquat. Geochem.* **2**, 273–298.

Bandstra, J.Z., and Brantley, S.L. (2008). Surface evolution of dissolving minerals investigated with a kinetic Ising model. *Geochim. Cosmochim. Acta* **72**, 2587–2600.

Barton, P., and Vatanatham, T. (1976). Kinetics of limestone neutralization of acid waters. *Environ. Sci. Technol.* **10**, 262–266.

Baudouin, V., Mougou, B., Rouxel, E., and Mardhel, V. (2009). Référentiel Hydrogéologique Français BDRHF Version 2 Bassin Loire-Bretagne (Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM).

Belarbi, Z., Gamby, J., Makhloufi, L., Sotta, B., and Tribollet, B. (2014). Inhibition of calcium carbonate precipitation by aqueous extract of *Paronychia argentea*. *J. Cryst. Growth* 386, 208–214.

Belcher, A.M., Wu, X.H., Christensen, R.J., Hansma, P.K., Stucky, G.D., and Morse, D.E. (1996). Control of crystal phase switching and orientation by soluble mollusc-shell proteins. *Nature* 381, 56–58.

Berner, R.A., and Morse, J.W. (1974). Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water; IV, Theory of calcite dissolution. *Am. J. Sci.* 274, 108–134.

Bertrand, G. (2009). De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques. (Bassin d'Argnat, Auvergne, France). phdthesis. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Bischoff, J.L. (1968). Kinetics of calcite nucleation: magnesium ion inhibition and ionic strength catalysis (*J Geophysical Research*).

Blasco, M., Gimeno, M.J., and Auqué, L.F. (2017). Comparison of Different Thermodynamic Databases used in a Geothermometrical Modelling Calculation. *Procedia Earth Planet. Sci.* 17, 120–123.

Boels, L., Wagterveld, R.M., Mayer, M.J., and Witkamp, G.J. (2010). Seeded calcite sonocrystallization. *J. Cryst. Growth* 312, 961–966.

Boluda-Botella, N., Gomis-Yagües, V., and Ruiz-Beviá, F. (2008). Influence of transport parameters and chemical properties of the sediment in experiments to measure reactive transport in seawater intrusion. *J. Hydrol.* 357, 29–41.

Bouillin, O., Desprez, N., and Monition, L. (1974). Les eaux souterraines dans la région centre (BRGM).

Brečević, L., and Kralj, D. (2007). On Calcium Carbonates: from Fundamental Research to Application. *Croat. Chem. Acta* 80, 467–484.

BRGM (2009). Carte piézométrique des basses eaux 2008 de la nappe de la Craie du Séno-Turonien dans le bassin Loire-Bretagne.

BRGM 0155N (1978). Carte géologique de Meaux à 1/50 000 et notice.

BRGM-0154N (1978). Carte géologique de Dammartin-en-Goële à 1/50000 et notice.

Buhmann, D., and Dreybrodt, W. (1985a). The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 2. Closed system. *Chem. Geol.* 53, 109–124.

Buhmann, D., and Dreybrodt, W. (1985b). The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 1. Open system. *Chem. Geol.* 48, 189–211.

Burch, T.E., Nagy, K.L., and Lasaga, A.C. (1993). Free energy dependence of albite dissolution kinetics at 80°C and pH 8.8. *Chem. Geol.* 105, 137–162.

Caissie, D., Jolicoeur, S., Bouchard, M., and Poncet, E. (2002). Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *J. Hydrol.* 258, 232–248.

Calon, N. (2016). Thèse "Rôle de la couche intermédiaire dans le potentiel de la voie ferrée". Université de Paris Est.

Casteel, R.C., and Banner, J.L. (2015a). Temperature-driven seasonal calcite growth and drip water trace element variations in a well-ventilated Texas cave: Implications for speleothem paleoclimate studies. *Chem. Geol.* 392, 43–58.

Casteel, R.C., and Banner, J.L. (2015b). Temperature-driven seasonal calcite growth and drip water trace element variations in a well-ventilated Texas cave: Implications for speleothem paleoclimate studies. *Chem. Geol.* 392, 43–58.

Castillo, L., Torin, E., Garcia, J.A., Carrasquero, M., Navas, M., and Vilorio, A. (2009). New Product for Inhibition of Calcium Carbonate Scale in Natural Gas and Oil Facilities Based on Aloe Vera: Application in Venezuelan Oilfields. (Society of Petroleum Engineers),

Cave, K., and Talens-Alessio, F.I. (2005). Comparative effect of Mn(II) and Fe(III) as activators and inhibitors of the adsorption of other heavy metals on calcite. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.* 268, 19–23.

CDG EXPRESS (2002). Le projet de liaison ferroviaire rapide entre la Gare de l'Est et l'Aéroport Charles de Gaulle (France, Ile de France: Laboratoire régional des ponts et chaussées de l'est parisien).

Chada, V.G.R., Hausner, D.B., Strongin, D.R., Rouff, A.A., and Reeder, R.J. (2005). Divalent Cd and Pb uptake on calcite cleavage faces: An XPS and AFM study. *J. Colloid Interface Sci.* 288, 350–360.

Chafetz, H.S., and Butler, J.C. (2006). Petrology of recent caliche pisolites, spherulites, and speleothem deposits from central Texas. *Sedimentol.* 275497 - 518 .

Chalmin, E., Orlyé, F.D., Zinger, L., Charlet, L., Geremia, R.A., Oriol, G., Menu, M., Baffier, D., and Reiche, I. (2005). Biotic versus abiotic calcite formation on prehistoric cave paintings: the Arcy-sur-Cure "Grande Grotte" (Yonne, France) case. pp. 185–197.

Charlton, S.R., and Parkhurst, D.L. (2011). Modules based on the geochemical model PHREEQC for use in scripting and programming languages. *Comput. Geosci.* 37, 1653–1663.

Chaussemier, M., Pourmohtasham, E., Gelus, D., Pécou, N., Perrot, H., Lédion, J., Cheap-Charpentier, H., and Horner, O. (2015). State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article. *Desalination* 356, 47–55.

Chibowski, E., Hołysz, L., and Szcześ, A. (2003). Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. *Water Res.* 37, 4685–4692.

Coetzee, P., Yachoby, M., and Howell, S. (1996). The role of Zinc in magnetic and other physical water treatment methods for the prevention of scale. *Water SA* 319–327.

Compton, R.G., Daly, P.J., and Houses, W.A. (1986). The dissolution of iceland spar crystals: The effect of surface morphology. *J. Colloid Interface Sci.* 113, 12–20.

Conso, M. (2013a). Impact des terrassements et du contexte géologique sur le colmatage des drainages enterrés de Lignes à Grande Vitesse (Le cnam/UPMC).

Conso, M. (2013b). Impact des terrassements et du contexte géologique sur le colmatage des drainages enterrés de Lignes à Grande Vitesse (SNCF Réseau/I&P/LVE/CIR).

Courmarcel, J. (1998). Le colmatage des collecteurs drainants par concrétions calcaires\_Rapport du stage \_SNCF (Ecole Nationale Supérieure des mines de Saint- Etienne).

Cuthbert, M.O., McMillan, L.A., Handley-Sidhu, S., Riley, M.S., Tobler, D.J., and Phoenix, V.R. (2013). A Field and Modeling Study of Fractured Rock Permeability Reduction Using Microbially Induced Calcite Precipitation. *Environ. Sci. Technol.* *47*, 13637–13643.

Dalas, E., and Koutsoukos, P.G. (1989). Calcium Carbonate Scale Formation on Heated Metal Surfaces. *Geothermics* *18*, 83–88.

Dalas, E., and Koutsoukos, P.G. (1990). Calcium carbonate scale formation and prevention in a flow-through system at various temperatures. *Desalination* *78*, 403–416.

Dalas, E., Chalias, A., Gatos, D., and Barlos, K. (2006). The inhibition of calcium carbonate crystal growth by the cysteine-rich Mdm2 peptide. *J. Colloid Interface Sci.* *300*, 536–542.

Dehotin, J., Chazelle, B., Laverne, H., Hasnaoui, A., Lambert, L., Breil, P., and Braud, I. (2015). Applying runoff mapping method IRIP for flooding risk analysis on railway infrastructure. *Houille Blanche - Rev. Int. Eau* 56–64.

Deleuze, M., and Brantley, S.L. (1997). Inhibition of calcite crystal growth by Mg<sup>2+</sup> at 100°C and 100 bars: Influence of growth regime. *Geochim. Cosmochim. Acta* *61*, 1475–1485.

Devidal, J.-L., Schott, J., and Dandurand, J.-L. (1997). An experimental study of kaolinite dissolution and precipitation kinetics as a function of chemical affinity and solution composition at 150°C, 40 bars, and pH 2, 6.8, and 7.8. *Geochim. Cosmochim. Acta* *61*, 5165–5186.

Didymus, J.M., Oliver, P., Mann, S., DeVries, A.L., Hauschka, P.V., and Westbroek, P. (1993). Influence of low-molecular-weight and macromolecular organic additives on the morphology of calcium carbonate. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* *89*, 2891–2900.

Dietzel, M., Usdowski, E., and Hoefs, J. (1992). Chemical and <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C- and <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O-isotope evolution of alkaline drainage waters and the precipitation of calcite. *Appl. Geochem.* *7*, 177–184.

Dietzel, M., Rinder, T., Leis, A., Reichl, P., Sellner, P., Draschitz, C., Plank, G., Klammer, D., and Schöfer, H. (2008). Koralm Tunnel as a Case Study for Sinter Formation in Drainage Systems – Precipitation Mechanisms and Retaliatory Action. *Geomech. Tunnelbau* *1*, 271–278.

Dietzel, M., Tang, J., Leis, A., and Köhler, S.J. (2009). Oxygen isotopic fractionation during inorganic calcite precipitation — Effects of temperature, precipitation rate and pH. *Chem. Geol.* *268*, 107–115.

Dietzel, M., Purgstaller, B., Leis, A., Reichl, P., Stadler, H., Niedermayr, A., Rinder, T., and Wagner, H. (2013). Current challenges for scaling of tunnel drainage systems – Modelling approaches, monitoring tools and prevention strategies / Aktuelle Herausforderungen bei der Versinterung von Tunneldränagen – Modellierungsansätze, Monitoringwerkzeuge und Präventionsstrategien. *Geomech. Tunn.* *6*, 743–753.

Donnet, M. (2002). Précipitation de CaCO<sub>3</sub> en réacteur tubulaire.

Donnet, M., Aimable, A., Lemaître, J., and Bowen, P. (2010). Contribution of Aggregation to the Growth Mechanism of Seeded Calcium Carbonate Precipitation in the Presence of Polyacrylic Acid. *J. Phys. Chem. B* *114*, 12058–12067.

Dove, P.M., and Hochella, M.F. (1993). Calcite precipitation mechanisms and inhibition by orthophosphate: In situ observations by Scanning Force Microscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta* *57*, 705–714.

Dreybrodt, W. (1988). *Processes in Karst Systems* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).

Dreybrodt, W., and Buhmann, D. (1991). A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion. *Chem. Geol.* *90*, 107–122.

Dreybrodt, W., Buhmann, D., Michaelis, J., and Usdowski, E. (1992a). Geochemically controlled calcite precipitation by CO<sub>2</sub> outgassing: Field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions. *Chem. Geol.* *97*, 285–294.

Dreybrodt, W., Buhmann, D., Michaelis, J., and Usdowski, E. (1992b). Geochemically controlled calcite precipitation by CO<sub>2</sub> outgassing: Field measurements of precipitation rates in comparison to theoretical predictions. *Chem. Geol.* *97*, 285–294.

Dreybrodt, W., Lauckner, J., Zaihua, L., Svensson, U., and Buhmann, D. (1996). The kinetics of the reaction  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$  as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CaCO<sub>3</sub>. *Geochim. Cosmochim. Acta* *60*, 3375–3381.

Du, Y., Lian, F., and Zhu, L. (2011). Biosorption of divalent Pb, Cd and Zn on aragonite and calcite mollusk shells. *Environ. Pollut.* *159*, 1763–1768.

Ducloux, J., Dupuis, T., and Laouina, A. (1987). Influence de gels minéraux et d'argiles sur la cristallogenèse du carbonate de calcium à partir des solutions bicarbonatées. *CATENA* *14*, 553–560.

Erga, O., Terjesen, S.G., Cox, R.A., and Peacocke, A.R. (1956). Kinetics of the Heterogeneous Reaction of Calcium Bicarbonate Formation, with Special Reference to Copper Ion Inhibition. *Acta Chem. Scand.* *10*, 872–874.

Euvrard, M., Membrey, F., Filiatre, C., Pignolet, C., and Foissy, A. (2006). Kinetic study of the electrocrystallization of calcium carbonate on metallic substrates. *J. Cryst. Growth* *291*, 428–435.

Evans, T. (2012). Influence of ionic strength on calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) polymorphism. *ArXiv120933333 Cond-Mat*.

Freund, D., Wang, Z., Rybacki, E., and Dresen, G. (2004). High-temperature creep of synthetic calcite aggregates: influence of Mn-content. *Earth Planet. Sci. Lett.* *226*, 433–448.

Gabitov, R.I., Sadekov, A., and Leinweber, A. (2014). Crystal growth rate effect on Mg/Ca and Sr/Ca partitioning between calcite and fluid: An in situ approach. *Chem. Geol.* *367*, 70–82.

Garcia, C., Courbin, G., Ropital, F., and Fiaud, C. (2001). Study of the scale inhibition by HEDP in a channel flow cell using a quartz crystal microbalance. *Electrochimica Acta* *46*, 973–985.

Garside, J. (1985). Industrial crystallization from solution. *Chem. Eng. Sci.* *40*, 3–26.

Garside, J., and Sohnel, O. (1993). *Precipitation: Basic Principles and Industrial Applications* (Oxford England; Boston: Butterworth-Heinemann).

Gat, D., Tsesarsky, M., Shamir, D., and Ronen, Z. (2014). Accelerated microbial-induced CaCO<sub>3</sub> precipitation in a defined coculture of ureolytic and non-ureolytic bacteria. *Biogeosciences* *11*, 2561–2569.

Gauthier, G., Chao, Y., Horner, O., Alos-Ramos, O., Hui, F., Lédion, J., and Perrot, H. (2012). Application of the Fast Controlled Precipitation method to assess the scale-forming ability of raw river waters. *Desalination* *299*, 89–95.

Ghobadina, M., Rahimi, H., Sohrabi, T., Naseri, A., and Tofighi, H. (2010). Potential risk of calcium carbonate precipitation in agricultural drain envelopes in arid and semi-arid areas. *Agric. Water Manag.* *97*, 1602–1608.

Giannimaras, E.K., and Koutsoukos, P.G. (1988). Precipitation of calcium carbonate in aqueous solutions in the presence of oxalate anions. *Langmuir* *4*, 855–861.

Girmscheid, G., Garmisch, T., and Meinlschmidt, A. (2003a). Scale sintering in tunnel drainages - recommendations for maintenance of tunnels. *Bauingenieur* *78*, 562–570.

Girmscheid, G., Garmisch, T., and Meinlschmidt, A. (2003b). Versinterung von Tunnel drainagen - Empfehlungen fuer die Instandhaltung von Tunneln / Scale sintering in tunnel drainages - recommendations for maintenance of tunnels. *Bauingenieur* *78*.

Girou, A., and Roques, H. (1971). Etude des cinétiques de précipitation des carbonates de calcium. *Bull. Assoc. Géographes Fr.* *48*, 227–233.

Giulietti, M., Seckler, M.M., Derenzo, S., Ré, M.I., and Cekinski, E. (2001). Industrial crystallization and precipitation from solutions: state of the technique. *Braz. J. Chem. Eng.* *18*, 423–440.

Gunn, J. (2007). *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation* (Geological Society of London).

Gupta, A.K. (2008). Relationship between the Mean Particle Size, the Size Factor, or Optimum Moisture Content, and Permeability of Sandy Soils. (Goa, India),.

Hamdouni, A., Montes-Hernandez, G., Tlili, M., Findling, N., Renard, F., and Putnis, C.V. (2016). Removal of Fe(II) from groundwater via aqueous portlandite carbonation and calcite-solution interactions. *Chem. Eng. J.* *283*, 404–411.

Hammer, Ø., Dysthe, D.K., Lelu, B., Lund, H., Meakin, P., and Jamtveit, B. (2008). Calcite precipitation instability under laminar, open-channel flow. *Geochim. Cosmochim. Acta* *72*, 5009–5021.

Hamrouni, B., and Dhahbi, M. (2002). Calcul des coefficients d'activité et répartition des espèces ioniques en solution aqueuse d'électrolytes.

Han, Y.-L., Lo, Y.-C., Cheng, C.-L., Yu, W.-J., Nagarajan, D., Liu, C.-H., Li, Y.-H., and Chang, J.-S. (2017). Calcium ion adsorption with extracellular proteins of thermophilic bacteria isolated from geothermal sites—A feasibility study. *Biochem. Eng. J.* *117, Part A*, 48–56.

Hasson, D., Shemer, H., and Sher, A. (2011). State of the Art of Friendly “Green” Scale Control Inhibitors: A Review Article. *Ind. Eng. Chem. Res.* *50*, 7601–7607.

Hawley, J.E., and Pytkowicz, R.M. (1973). Interpretation of pH measurements in concentrated electrolyte solutions. *Mar. Chem.* *1*, 245–250.

Hellevang, H., Pham, V.T.H., and Aagaard, P. (2013). Kinetic modelling of CO<sub>2</sub>–water–rock interactions. *Int. J. Greenh. Gas Control* *15*, 3–15.

Hellmann, R., and Tisserand, D. (2006). Dissolution kinetics as a function of the Gibbs free energy of reaction: An experimental study based on albite feldspar. *Geochim. Cosmochim. Acta* *70*, 364–383.

Herman, J.S., and Lorah, M.M. (1988). Calcite precipitation rates in the field: Measurement and prediction for a travertine-depositing stream. *Geochim. Cosmochim. Acta* *52*, 2347–2355.

Hori, M., Ishikawa, T., Nagaishi, K., Lin, K., Wang, B.-S., You, C.-F., Shen, C.-C., and Kano, A. (2013). Prior calcite precipitation and source mixing process influence Sr/Ca, Ba/Ca and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr of a stalagmite developed in southwestern Japan during 18.0–4.5 ka. *Chem. Geol.* *347*, 190–198.

IDF.ars.santé (2014). Agence régionale de santé Ile-de-France | La santé avance en Île-de-France.

Ischenko, V., Woltersdorf, J., Pippel, E., Köferstein, R., and Abicht, H.-P. (2007). Formation of metastable calcite-type barium carbonate during low-temperature decomposition of (Ba,Ti)-precursor complexes. *Solid State Sci.* *9*, 303–309.

Jang, Y.-S., Kim, B., and Lee, J.-W. Evaluation of discharge capacity of geosynthetic drains for potential use in tunnels. *Geotext. Geomembr.*

Jia, N. (2012). Etude du colmatage par la calcite des réseaux de drainage ferroviaire (Ecole des Ponts ParisTech).

Jia, N. (2013). Linéaire du Collecteur drainant et la fraction colmatés sur le réseaux LGV Français\_Rapport SNCF Réseau/ I&P/LVE/CIR.

Jia, N. (2014). Etude de la carbonatation des dispositifs de drainage de l'infrastructure ferroviaire-visite du site complémentaire-Tunnel Marseille plus prélèvement (Marseille: SNCF Réseau/I&P/LVE/CIR).

Jia, N., Tassin, B., Deneele, D., Prévot, F., Nivon, D., Koscielny, M., and Calon, N. (2014). Clogging of drainage devices in railway infrastructures: survey and assessment. In *GEORAIL 2014*, (Champ sur Marne, France: IFSTTAR; ISSN: 168-4704; ISBN: 978-2-7208-2621-4), pp. 601–610.

Kadis, R. (2002). Secondary pH standards and their uncertainty in the context of the problem of two pH scales. *Anal. Bioanal. Chem.* *374*, 817–823.

Kadis, R., and Leito, I. (2010). Evaluation of the residual liquid junction potential contribution to the uncertainty in pH measurement: A case study on low ionic strength natural waters. *Anal. Chim. Acta* *664*, 129–135.

Kavanagh, A.M., Rayment, T., and J. Price, T. (1990). Inhibitor effects on calcite growth at low supersaturations. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* *86*, 965–972.

Kawano, J., Maeda, S., and Nagai, T. (2016). The effect of Mg<sup>2+</sup> incorporation on the structure of calcium carbonate clusters: investigation by the anharmonic downward distortion following method. *Phys. Chem. Chem. Phys.* *18*, 2690–2698.

Keysar, S., Semiat, R., Hasson, D., and Yahalom, J. (1994). Effect of Surface Roughness on the Morphology of Calcite Crystallizing on Mild Steel. *J. Colloid Interface Sci.* *162*, 311–319.

Kim, G., and Youn, H. (2016). Microbially Induced Calcite Precipitation Employing Environmental Isolates. *Materials* *9*, 468.

King, C.V., and Liu, C.L. (1933). The Rate of Solution of Marble in Dilute Acids. *J. Am. Chem. Soc.* *55*, 1928–1940.

Kirboga, S., and Öner, M. (2012). The inhibitory effects of carboxymethyl inulin on the seeded growth of calcium carbonate. *Colloids Surf. B Biointerfaces* *91*, 18–25.

Kitamura, M. (2001). Crystallization and Transformation Mechanism of Calcium Carbonate Polymorphs and the Effect of Magnesium Ion. *J. Colloid Interface Sci.* *236*, 318–327.

Kroening, D.E., Snipes, D.S., Brame, S.E., Hodges, V.P., and Temples, T.J. (1996). The Rehabilitation of Monitoring Wells Clogged by Calcite Precipitation and Drilling Mud.

Kumar, T., Vishwanatham, S., and Kundu, S.S. (2010). A laboratory study on pteroyl-l-glutamic acid as a scale prevention inhibitor of calcium carbonate in aqueous solution of synthetic produced water. *J. Pet. Sci. Eng.* *71*, 1–7.

Lamas-Lopez, F. (2016). Field and laboratory investigation on the dynamic behaviour of conventional railway track-bed materials in the context of traffic upgrade. *Paris Est*.

Lasaga, A.C. (1981). Kinetics of Geochemical Processes (Reviews in Mineralogy, Vol 8) (Mineralogical Society of America).

LCPC (2006). Classification Des Sols Lcpc Et Gtr Ou Gmtr\_el Fissi.

Lebedev, A.L. (2015). Kinetics of gypsum dissolution in water. *Geochem. Int.* *53*, 811–824.

Legrand, L., and Leroy, P. (1995). Prévention de la corrosion et de l'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau (CIFEC).

Leybourne, M.I., Cameron, E.M., Reich, M., Palacios, C., Faure, K., and Johannesson, K.H. (2013). Stable isotopic composition of soil calcite (O, C) and gypsum (S) overlying Cu deposits in the Atacama Desert, Chile: Implications for mineral exploration, salt sources, and paleoenvironmental reconstruction. *Appl. Geochem.* *29*, 55–72.

LGV Est -DOE (2003). Dossier des ouvrages exécutés (DOE) - LGV Est - géomaquette.

Lin, Y.-P., and Singer, P.C. (2009). Effect of Mg<sup>2+</sup> on the kinetics of calcite crystal growth. *J. Cryst. Growth* *312*, 136–140.

Liu, D. (2011). Research on Performance Evaluation and Anti-scaling Mechanism of Green Scale Inhibitors by Static and Dynamic Methods. *Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM*.



Liu, D., Dong, W., Li, F., Hui, F., and Lédion, J. (2012). Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods. *ResearchGate* 304, 1–10.

Liu, Z., Svensson, U., Dreybrodt, W., Daoxian, Y., and Buhmann, D. (1995). Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 3087–3097.

Liu, Z., Sun, Y., Zhou, X., Wu, T., Tian, Y., and Wang, Y. (2011). Synthesis and scale inhibitor performance of polyaspartic acid. *J. Environ. Sci.* 23, *Supplement*, S153–S155.

Logan, S.R. (1967). Effects of ionic strength on the rates of reaction between ions in solution. *Trans. Faraday Soc.* 63, 3004–3008.

Louchart, J.-N., and Mahuet, J.-L. (2008). Tunnel Maurice Lemaire Travaux d'étanchéité et d'imperméabilisation.

De Lucia, M., and Kühn, M. (2013). Coupling R and PHREEQC: Efficient Programming of Geochemical Models. *Energy Procedia* 40, 464–471.

Lund, K., Fogler, H.S., McCune, C.C., and Ault, J.W. (1975). Acidization—II. The dissolution of calcite in hydrochloric acid. *Chem. Eng. Sci.* 30, 825–835.

Malhèrbe, S. (2001a). Etude et optimisation des dispositifs de drainage profond dans les déblais humides\_Rapport Général\_SNCF ASS032.

Malhèrbe, S. (2001b). Etude et optimisation des dispositifs de drainage profond dans les déblais humides\_Retour d'expérience\_SNCF ASS033.

Malkaj, P., Kanakis, J., and Dalas, E. (2004). The effect of leucine on the crystal growth of calcium carbonate. *J. Cryst. Growth* 266, 533–538.

Manoli, F., and Dalas, E. (2001). Calcium carbonate crystallization in the presence of glutamic acid. *J. Cryst. Growth* 222, 293–297.

Maraghni, W. (2011). Etude du colmatage des ouvrages de drainage ferroviaire (Université Paris Diderot).

Martin, J.C., and Lalleron, A. (2009). Carte piézométrique des basses eaux 2008 de la nappe de la Craie du Séno-Turonien dans le bassin Loire-Bretagne.

Martin-Dominguez, A. (1994). Contribution à l'étude des mécanismes d'entartrage: influence de la matière humique dans l'inhibition de la croissance cristalline du carbonate de calcium (Toulouse, INSA).

Martinod, A., Euvrad, M., Foissy, A., and Neville, A. (2008). Progressing the understanding of chemical inhibition of mineral scale by green inhibitors. *Desalination* 220, 345–352.

Martinod, A., Neville, A., Euvrad, M., and Sorbie, K. (2009). Electrodeposition of a calcareous layer: Effects of green inhibitors. *Chem. Eng. Sci.* 64, 2413–2421.

Maskenskaya, O.M., Drake, H., Mathurin, F.A., and Åström, M.E. (2015). The role of carbonate complexes and crystal habit on rare earth element uptake in low-temperature calcite in fractured crystalline rock. *Chem. Geol.* **391**, 100–110.

Mastrocicco, M., Colombani, N., and Antonellini, M. (2012). Freshwater–seawater mixing experiments in sand columns. *J. Hydrol.* **448-449**, 112–118.

Meldrum, F.C., and Hyde, S.T. (2001). Morphological influence of magnesium and organic additives on the precipitation of calcite. *J. Cryst. Growth* **231**, 544–558.

Meriaux, P., Veylon, G., Faure, Y.-H., Gallo, R., Nivon, D., and Bertrand, C. (2013). Vieillissement des géofiltres utilisés dans le drainage des ouvrages hydrauliques: enseignements tirés du démantèlement d'un dispositif expérimental ancien. (Aix-en-Provence: Lavoisier), pp. 587–598.

Mériaux, P., Veylon, G., Faure, Y.-H., and Bertrand, C. (2013). Vieillissement des géofiltres utilisés dans le drainage des ouvrages hydrauliques: enseignements tirés du démantèlement d'un dispositif expérimental ancien. (Aix-en-Provence),.

Meyer, H.J. (1984a). The influence of impurities on the growth rate of calcite. *J. Cryst. Growth* **66**, 639–646.

Meyer, H.J. (1984b). The influence of impurities on the growth rate of calcite. *J. Cryst. Growth* **66**, 639–646.

Michard, G. (2002). *Chimie des eaux naturelles: Principes de géochimie des eaux* (Paris: PUBLISUD, ISBN 9782866008901).

Miksic, B.A., Kharshan, M.A., and Furman, A.Y. (2005). Vapor corrosion and scale inhibitors formulated from biodegradable and renewable raw materials. In *European Symposium on Corrosion Inhibitors (10 SEIC) Ferrara*.

Miyasaka, E., Ebihara, S., and Hirasawa, I. (2006). Investigation of primary nucleation phenomena of acetylsalicylic acid crystals induced by ultrasonic irradiation—ultrasonic energy needed to activate primary nucleation. *J. Cryst. Growth* **295**, 97–101.

Miyata, K.-I., and Nakahara, Y. (1977). The preparation of inorganic particles by interfacial reaction. *Prog. Org. Coat.* **5**, 115–129.

Morse, J.W. (1978). Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water; VI, The near-equilibrium dissolution kinetics of calcium carbonate-rich deep sea sediments. *Am. J. Sci.* **278**, 344–353.

Morse, J.W., Mucci, A., and Millero, F.J. (1980). The solubility of calcite and aragonite in seawater of 35% salinity at 25°C and atmospheric pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta* **44**, 85–94.

Mullin, J.W. (1972). *Crystallization* (London: Butterworth & Co Publishers Ltd).

Mullin, J.W. (1997). *Crystallization* (Boston: Butterworth-Heinemann).

De Muynck, W., De Belie, N., and Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecol. Eng.* **36**, 118–136.

Myerson, A. (2002). *Handbook of Industrial Crystallization* (Butterworth-Heinemann).

Nakahara, Y., Mizuguchi, M., and Miyata, K.-I. (1979). Effects of surfactants on CaCO<sub>3</sub> spheres prepared by interfacial reaction method. *J. Colloid Interface Sci.* *68*, 401–407.

Nancollas, G.H. (1979). The growth of crystals in solution. *Adv. Colloid Interface Sci.* *10*, 215–252.

Nancollas, G.H., and Reddy, M.M. (1971). The crystallization of calcium carbonate. II. Calcite growth mechanism. *J. Colloid Interface Sci.* *37*, 824–830.

Navarre-Sitchler, A., and Jung, H. (2017). Complex Coupling of Fluid Transport and Geochemical Reaction Rates: Insights from Reactive Transport Models. *Procedia Earth Planet. Sci.* *17*, 5–8.

Nielsen, A.E. (1964). Kinetics of precipitation (Pergamon Press; [distributed in the Western Hemisphere by Macmillan, New York]).

Nielsen, A.E., and Söhnel, O. (1971). Interfacial tensions electrolyte crystal-aqueous solution, from nucleation data. *J. Cryst. Growth* *11*, 233–242.

Nielsen, L.C., De Yoreo, J.J., and DePaolo, D.J. (2013). General model for calcite growth kinetics in the presence of impurity ions. *Geochim. Cosmochim. Acta* *115*, 100–114.

Oelkers, E.H. (2001). General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution. *Geochim. Cosmochim. Acta* *65*, 3703–3719.

Ogino, T., Suzuki, T., and Sawada, K. (1987). The formation and transformation mechanism of calcium carbonate in water. *Geochim. Cosmochim. Acta* *51*, 2757–2767.

Ogino, T., Suzuki, T., and Sawada, K. (1990). The rate and mechanism of polymorphic transformation of calcium carbonate in water. *J. Cryst. Growth* *100*, 159–167.

Onur, E.M. (2014). Predicting the permeability of sandy soils from grain size distributions (M.S., Kent State University).

Parkhurst, D.L. (1995). User's guide to PHREEQC: a computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations / (Lakewood, Colo).

Pasquet, A., and Legrand, J. (1967). Rapport régional 1967-géologie-forage-calcaire de saint ouen (France: the soil department of laboratory BLPC).

Pentecost, A. (2005). Travertine (Springer Science & Business Media).

Pérez-Garrido, C., Fernández-Díaz, L., Pina, C.M., and Prieto, M. (2007). In situ AFM observations of the interaction between calcite surfaces and Cd-bearing aqueous solutions. *Surf. Sci.* *601*, 5499–5509.

Pernot, B. (1997). Modification du pouvoir entartrant d'eaux calcifiantes par des cations métalliques: fer, aluminium, manganèse, zinc (Besançon).

Plummer, L.N., and Busenberg, E. (1982). The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Geochim. Cosmochim. Acta* *46*, 1011–1040.

Plummer, L.N., Parkhurst, D.L., and Wigley, T.M.L. (1979). Critical Review of the Kinetics of Calcite Dissolution and Precipitation. In *Chemical Modeling in Aqueous Systems*, American chemical society, pp. 537–573.

Pocker, Y., and Bjorkquist, D.W. (1977). Stopped-flow studies of carbon dioxide hydration and bicarbonate dehydration in water and water-d<sub>2</sub>. Acid-base and metal ion catalysis. *J. Am. Chem. Soc.* **99**, 6537–6543.

Pokrovsky, O.S., and Schott, J. (2001). Kinetics and Mechanism of Dolomite Dissolution in Neutral to Alkaline Solutions Revisited. *Am. J. Sci.* **301**, 597–626.

Pokrovsky, O.S., and Schott, J. (2004). Experimental study of brucite dissolution and precipitation in aqueous solutions: surface speciation and chemical affinity control. *Geochim. Cosmochim. Acta* **68**, 31–45.

Pokrovsky, O.S., Schott, J., and Thomas, F. (1999). Processes at the magnesium-bearing carbonates/solution interface. I. a surface speciation model for magnesite. *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, 863–880.

Pokrovsky, O.S., Golubev, S.V., and Schott, J. (2005). Dissolution kinetics of calcite, dolomite and magnesite at 25 °C and 0 to 50 atm pCO<sub>2</sub>. *Chem. Geol.* **217**, 239–255.

Pokrovsky, O.S., Golubev, S.V., Schott, J., and Castillo, A. (2009). Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150 °C and 1 to 55 atm pCO<sub>2</sub>: New constraints on CO<sub>2</sub> sequestration in sedimentary basins. *Chem. Geol.* **265**, 20–32.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., and Flannery, B.P. (1992). *Numerical recipes in C: The art of scientific computing..* Second Edition. Cambridge University Press.

Pu, J., Wang, A., Shen, L., Yin, J., Yuan, D., and Zhao, H. (2016). Factors controlling the growth rate, carbon and oxygen isotope variation in modern calcite precipitation in a subtropical cave, Southwest China. *J. Asian Earth Sci.* **119**, 167–178.

Qiang, X., Sheng, Z., and Zhang, H. (2013). Study on scale inhibition performances and interaction mechanism of modified collagen. *Desalination* **309**, 237–242.

Quan, Z., Chen, Y., Wang, X., Shi, C., Liu, Y., and Ma, C. (2008). Experimental study on scale inhibition performance of a green scale inhibitor polyaspartic acid. *Sci China Ser B-Chem* 695–699, doi: 10.1007/s11426-008-0063-y.

Reddy, M.M. (1977). Crystallization of calcium carbonate in the presence of trace concentrations of phosphorus-containing anions. *J. Cryst. Growth* **41**, 287–295.

Reddy, M.M. (1978). Kinetic inhibition of calcium carbonate formation by wastewater constituents. *Chem. Wastewater Technol.* 31–58.

Reddy, M.M., and Gaillard, W.D. (1981a). Kinetics of calcium carbonate (calcite)-seeded crystallization: Influence of solid/solution ratio on the reaction rate constant. *J. Colloid Interface Sci.* **80**, 171–178.

Reddy, M.M., and Gaillard, W.D. (1981b). Kinetics of calcium carbonate (calcite)-seeded crystallization: Influence of solid/solution ratio on the reaction rate constant. *J. Colloid Interface Sci.* **80**, 171–178.

Reddy, M.M., and Hoch, A.R. (2001). Calcite Crystal Growth Rate Inhibition by Polycarboxylic Acids. *J. Colloid Interface Sci.* 235, 365–370.

Reddy, M.M., and Nancollas, G.H. (1971). The crystallization of calcium carbonate I. Isotopic Exchange and Kinetics. *J. Colloid Interface Sci.* 36, 166–172.

Reddy, M.M., and Nancollas, G.H. (1973). Calcite crystal growth inhibition by phosphonates. *Desalination* 12, 61–73.

Reddy, M.M., and Nancollas, G.H. (1976). The crystallization of calcium carbonate: IV. The effect of magnesium, strontium and sulfate ions. *J. Cryst. Growth* 35, 33–38.

Reddy, M.M., and Wang, K.K. (1980). Crystallization of calcium carbonate in the presence of metal ions. *J. Cryst. Growth* 50, 470–480.

Ries, J.B. (2005). Aragonite production in calcite seas: effect of seawater Mg/Ca ratio on the calcification and growth of the calcareous alga *Penicillus capitatus*. *Q 2005 Paleontol. Soc. Rights Reserv.* 0094-8373053103-0008100 Paleobiology pp. 445–458.

Rimstidt, J.D., and Barnes, H.L. (1980). The kinetics of silica-water reactions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, 1683–1699.

Rinder, T., Dietzel, M., and Leis, A. (2013). Calcium carbonate scaling under alkaline conditions – Case studies and hydrochemical modelling. *Appl. Geochem.* 35, 132–141.

Roques, H., and Girou, A. (1971). Etude des cinétiques de précipitation des carbonates de calcium. *Bull. Assoc. Géographes Fr.* 48, 227–233.

Rossi, C., and Lozano, R.P. (2016). Hydrochemical controls on aragonite versus calcite precipitation in cave dripwaters. *Geochim. Cosmochim. Acta* 192, 70–96.

Rousse, E. (2015). Impact du contexte géologique et géotechnique sur la formation des dépôts carbonatés dans les drainages de voies ferrées\_Rapport du stage\_SNCF (SNCF Réseau/I&P/LVE/CIR).

Ruiz-Agudo, E., Putnis, C.V., Rodriguez-Navarro, C., and Putnis, A. (2011). Effect of pH on calcite growth at constant ratio and supersaturation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 284–296.

Sangwal, K. (2007). Additives and Crystallization Processes: From Fundamentals to Applications (John Wiley & Sons).

Sanjuan, B., and Girard, J.P. (1996). Review of kinetic data on carbonate mineral precipitation (BRGM).

Schmidt, V., Hirt, A.M., Leiss, B., Burlini, L., and Walter, J.M. (2009). Quantitative correlation of texture and magnetic anisotropy of compacted calcite–muscovite aggregates. *J. Struct. Geol.* 31, 1062–1073.

Schott, J., Pokrovsky, O.S., and Oelkers, E.H. (2009). The Link Between Mineral Dissolution/Precipitation Kinetics and Solution Chemistry. *Rev. Mineral. Geochem.* 70, 207–258.

Selig, E.T., and Waters, J.M. (1994). Track Geotechnology and Substructure Management (Thomas Telford).

Shahryari, A., and Pakshir, M. (2008). Influence of a modulated electromagnetic field on fouling in a double-pipe heat exchanger. *J. Mater. Process. Technol.* *203*, 389–395.

Sham, E., Mantle, M.D., Mitchell, J., Tobler, D.J., Phoenix, V.R., and Johns, M.L. (2013). Monitoring bacterially induced calcite precipitation in porous media using magnetic resonance imaging and flow measurements. *J. Contam. Hydrol.* *152*, 35–43.

Shankar, B.. (2014). Determination of Scaling and corrosion tendencies of water through the use of Langelier and Ryznar Indices. *Sch. J. Eng. Technol. SJET* 123–127.

Shepherd, R.G. (1989). Correlations of permeability and grain size.

Shi, Q., Zhang, G., Feng, Q., Ou, L., and Lu, Y. (2013). Effect of the lattice ions on the calcite flotation in presence of Zn(II). *Miner. Eng.* *40*, 24–29.

Shirsath, S.R., Sonawane, S.H., Saini, D.R., and Pandit, A.B. (2015). Continuous precipitation of calcium carbonate using sonochemical reactor. *Ultrason. Sonochem.* *24*, 132–139.

Sigg, L., Behra, P., and Stumm, W. (2014). *Chimie des milieux aquatiques - 5e édition: Cours et exercices corrigés* (Dunod).

Sims, S.D., Didymus, J.M., and Mann, S. (1995). Habit modification in synthetic crystals of aragonite and vaterite. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* 1031–1032.

Sjöberg, E.L. (1976). A fundamental equation for calcite dissolution kinetics. *Geochim. Cosmochim. Acta* *40*, 441–447.

Sjöberg, E.L. (1978). *Kinetics and mechanism of calcite dissolution in aqueous solutions at low temperatures /* (Stockholm: Almqvist & Wiksell,).

Sjöberg, E.L., and Rickard, D.T. (1984). Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62°C at pH 2.7 to 8.4 in aqueous solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta* *48*, 485–493.

SNCF (1996a): IN0259: Conception, réalisation et entretien: des ouvrages de drainage et d'écoulement; des structures d'assise et des plates-formes (SNCF).

SNCF (1996b): IN0260: Dimensionnement des structures d'assise.

SNCF (1999). Fiche Technique ST N°590B, Specification technique pour la fourniture des granulats utilisés pour la réalisation et l'entretien des voies ferrées. Référentiel Infrastructure SNCF.

SNCF (2002): IN 0261: Emploi des géosynthétiques (Géotextiles, géogrilles, géomembranes). Spécifications des géosynthétiques utilisés dans les assises ferroviaires (SNCF).

SNCF (2003). Dossier étude du sol de LGV Est- Européen - Géomaquette du site de Chauconin (PK17 - PK20).

SNCF (2006): IN3278: Référentiel technique pour la réalisation des LGV - partie Génie Civil (SNCF).

SNCF (2007): IN3473: Caractéristiques et modalités pour la fourniture de Collecteurs Drainants (CD - ex ST 614 A) (SNCF).

SNCF (2017). Atlas du réseau ferré en France en 2017.

Stabnikov, V., Naeimi, M., Ivanov, V., and Chu, J. (2011). Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement. *Cem. Concr. Res.* *41*, 1143–1149.

Stephenson, A.E., Hunter, J.L., Han, N., DeYoreo, J.J., and Dove, P.M. (2011). Effect of ionic strength on the Mg content of calcite: Toward a physical basis for minor element uptake during step growth. *Geochim. Cosmochim. Acta* *75*, 4340–4350.

Stillings, L.L., and Poulson, S.R. (2010). Rates of geochemical processes and their application to natural systems. *Chem. Geol.* *269*, 1–2.

Stockmann, G.J., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., and Oelkers, E.H. (2011). Do carbonate precipitates affect dissolution kinetics? 1: Basaltic glass. *Chem. Geol.* *284*, 306–316.

Stockmann, G.J., Wolff-Boenisch, D., Gislason, S.R., and Oelkers, E.H. (2013). Do carbonate precipitates affect dissolution kinetics?: 2: Diopside. *Chem. Geol.* *337–338*, 56–66.

Stockmann, G.J., Wolff-Boenisch, D., Bovet, N., Gislason, S.R., and Oelkers, E.H. (2014). The role of silicate surfaces on calcite precipitation kinetics. *Geochim. Cosmochim. Acta* *135*, 231–250.

Stoica-Guzun, A., Stroescu, M., Jinga, S., Jipa, I., Dobre, T., and Dobre, L. (2012). Ultrasound influence upon calcium carbonate precipitation on bacterial cellulose membranes. *Ultrason. Sonochem.* *19*, 909–915.

Sun, Y., Xiang, W., and Wang, Y. (2009). Study on polyepoxysuccinic acid reverse osmosis scale inhibitor. *J. Environ. Sci.* *S73–S75*.

Svensson, U., and Dreybrodt, W. (1992). Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO<sub>2</sub>-water systems approaching calcite equilibrium. *Chem. Geol.* *100*, 129–145.

Tai, C.Y., Chang, M.-C., Liu, C.-C., and Wang, S.S.-S. (2014). Growth of calcite seeds in a magnetized environment. *J. Cryst. Growth* *389*, 5–11.

Takasaki, S., Parsiegla, K.I., and Katz, J.L. (1994). Calcite growth and the inhibiting effect of iron(III). *J. Cryst. Growth* *143*, 261–268.

Tardy, Y. (1993). *Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*: Laura Sigg et al. Masson S.A., Paris, 1992, 391p. (ISBN 2-225-83905-0; en Français). *Geochim. Cosmochim. Acta* *57*, 1638.

Teghidet, H. (2012). Etude de la cristallisation contrôlée de la calcite par voie électrochimique. Effet des ions étrangers au système calcocarbonique sur la nucléation-croissance de la calcite. phdthesis. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.

Teng, H.H., Dove, P.M., and De Yoreo, J.J. (2000). Kinetics of calcite growth: surface processes and relationships to macroscopic rate laws. *Geochim. Cosmochim. Acta* *64*, 2255–2266.

Tiruta-Barna, L. (2008). Using PHREEQC for modelling and simulation of dynamic leaching tests and scenarios. *J. Hazard. Mater.* *157*, 525–533.

Tominaga, H., Adzumi, H., and Isobe, T. (1939). Viscosity effect on the rate of solution of calcium carbonate in hydrochloric acid. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 14, 348–352.

Torres, I.B.L., Amatya, D.M., Sun, G., and Callahan, T.J. (2011). Seasonal rainfall- runoff relationships in a lowland forested watershed in the southeastern USA.

Tremaine, D.M., and Froelich, P.N. (2013). Speleothem trace element signatures: A hydrologic geochemical study of modern cave dripwaters and farmed calcite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 121, 522–545.

Trinh, V.-N., Tang, A.-M., Cui, Y.-J., Canou, J., Dupla, J.-C., Calon, N., Lambert, L., Robinet, A., and Schoen, O. (2011). Caractérisation des matériaux constitutifs de plate-forme ferroviaire ancienne. *Rev. Fr. Géotechnique* 65–74.

Uzdowski, E. (1982). Reactions and Equilibria in the Systems  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  and  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  ( $0^\circ\text{-}50^\circ\text{C}$ ) - A Review. *Neues Jahrb. Für Mineral. - Abh.* 148–171.

Varaprasad, B.J.S., and Vishwanadh, G.K. (2011). Investigations on Thickness of Deposits in PVC Pipes. pp. 25–33.

Varaprasad, B.J.S., and Viswanadh, G.K. (2012). A study on scale formation in water distribution systems. p p. 129–136.

Vavouraki, A.I., Putnis, C.V., Putnis, A., and Koutsoukos, P.G. (2008). An Atomic Force Microscopy study of the growth of calcite in the presence of sodium sulfate. *Chem. Geol.* 253, 243–251.

Vazirian, M.M., Charpentier, T.V.J., de Oliveira Penna, M., and Neville, A. (2016). Surface inorganic scale formation in oil and gas industry: As adhesion and deposition processes. *J. Pet. Sci. Eng.* 137, 22–32.

Vercouter, T., Reiller, P.E., Ansoborlo, E., Février, L., Gilbin, R., Lomenech, C., and Philippini, V. (2015). A modelling exercise on the importance of ternary alkaline earth carbonate species of uranium(VI) in the inorganic speciation of natural waters. *Appl. Geochem.* 55, 192–198.

Verraest, D.L., Batelaan, J.G., Peters, J.A., and Van Bekkum, H. (1998). Carboxymethyl inulin.

Wada, K., Kanamura, K., and Umegaki, T. (2001). Effects of Carboxylic Acids on the Crystallization of Calcium Carbonate. *J Colloid Interface Sci* 233, 65–72.

Wagterveld, R.M., Boels, L., Mayer, M.J., and Witkamp, G.J. (2011). Visualization of acoustic cavitation effects on suspended calcite crystals. *Ultrason. Sonochem.* 18, 216–225.

Wan, B., Yan, Y., Liu, F., Tan, W., Chen, X., and Feng, X. (2016). Surface adsorption and precipitation of inositol hexakisphosphate on calcite: A comparison with orthophosphate. *Chem. Geol.* 421, 103–111.

Wang, J., Liang, Y., and Chen, S. (2016). Influence of electromagnetic field intensity on the metastable zone width of  $\text{CaCO}_3$  crystallization in circulating water. *J. Cryst. Growth* 450, 56–60.

Wang, Z., Hu, P., Gaetani, G., Liu, C., Saenger, C., Cohen, A., and Hart, S. (2013). Experimental calibration of Mg isotope fractionation between aragonite and seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta* 102, 113–123.



Van der Weijden, C.H., and van der Weijden, R.D. (2014). Calcite growth: Rate dependence on saturation, on ratios of dissolved calcium and (bi)carbonate and on their complexes. *J. Cryst. Growth* 394, 137–144.

Weyl, P.K. (1958). The Solution Kinetics of Calcite. *J. Geol.* 66, 163–176.

Wiechers, H.N.S., Sturrock, P., and Marais, G. v. R. (1975). Calcium carbonate crystallization kinetics. *Water Res.* 9, 835–845.

Wu, Z., Francis, L.F., and Davidson, J.H. (2009). Scale formation on polypropylene and copper tubes in mildly supersaturated tap water. *Sol. Energy* 83, 636–645.

Xiaokai, X. (2008). Research on the electromagnetic anti-fouling technology for heat transfer enhancement. *Appl. Therm. Eng.* 28, 889–894.

Xu, J., Fan, C., and Teng, H.H. (2012). Calcite dissolution kinetics in view of Gibbs free energy, dislocation density, and pCO<sub>2</sub>. *Chem. Geol.* 322–323, 11–18.

Yang, L., and Steefel, C.I. (2008). Kaolinite dissolution and precipitation kinetics at 22 °C and pH 4. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 99–116.

Yang, X., and Xu, G. (2011). The influence of xanthan on the crystallization of calcium carbonate. *J. Cryst. Growth* 314, 231–238.

Yang, Q., Liu, Y., Gu, A., Ding, J., and Shen, Z. (2001). Investigation of Calcium Carbonate Scaling Inhibition and Scale Morphology by AFM. *J. Colloid Interface Sci.* 240, 608–621.

Yee, E. (2015). Substrate Modification and Magnetic Water Treatment on the Maintenance of Tunnel Drainage Systems. II: Field Tests. *J. Perform. Constr. Facil.* 29, 04014077.

Yee, E., Lee, J.W., Lim, D.S., and Chun, B.S. (2012). Magnetic Water Treatment to Inhibit Calcium Carbonate Scale Deposition in the Drainage System of an Old Tunnel in Seoul, South Korea. *Adv. Mater. Res.* 594-597, 2045–2055.

Yee, E., Jang, Y., and Chun, B. (2015). Substrate Modification and Magnetic Water Treatment on the Maintenance of Tunnel Drainage Systems. I: Feasibility Tests. *J. Perform. Constr. Facil.* 29, 04014076.

Yuan, D., and Liu, Z. (1998). *Global karst correlation* (Science Press).

Zarga, Y., Ben Boubaker, H., Ghaffour, N., and Elfil, H. (2013). Study of calcium carbonate and sulfate co-precipitation. *Chem. Eng. Sci.* 96, 33–41.

Zhang, Y., and Dawe, R.A. (2000). Influence of Mg<sup>2+</sup> on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology. *Chem. Geol.* 163, 129–138.

Zhang, H., Luo, X., Lin, X., Tang, P., Lu, X., Yang, M., and Tang, Y. (2016). Biodegradable carboxymethyl inulin as a scale inhibitor for calcite crystal growth: Molecular level understanding. *Desalination* 381, 1–7.

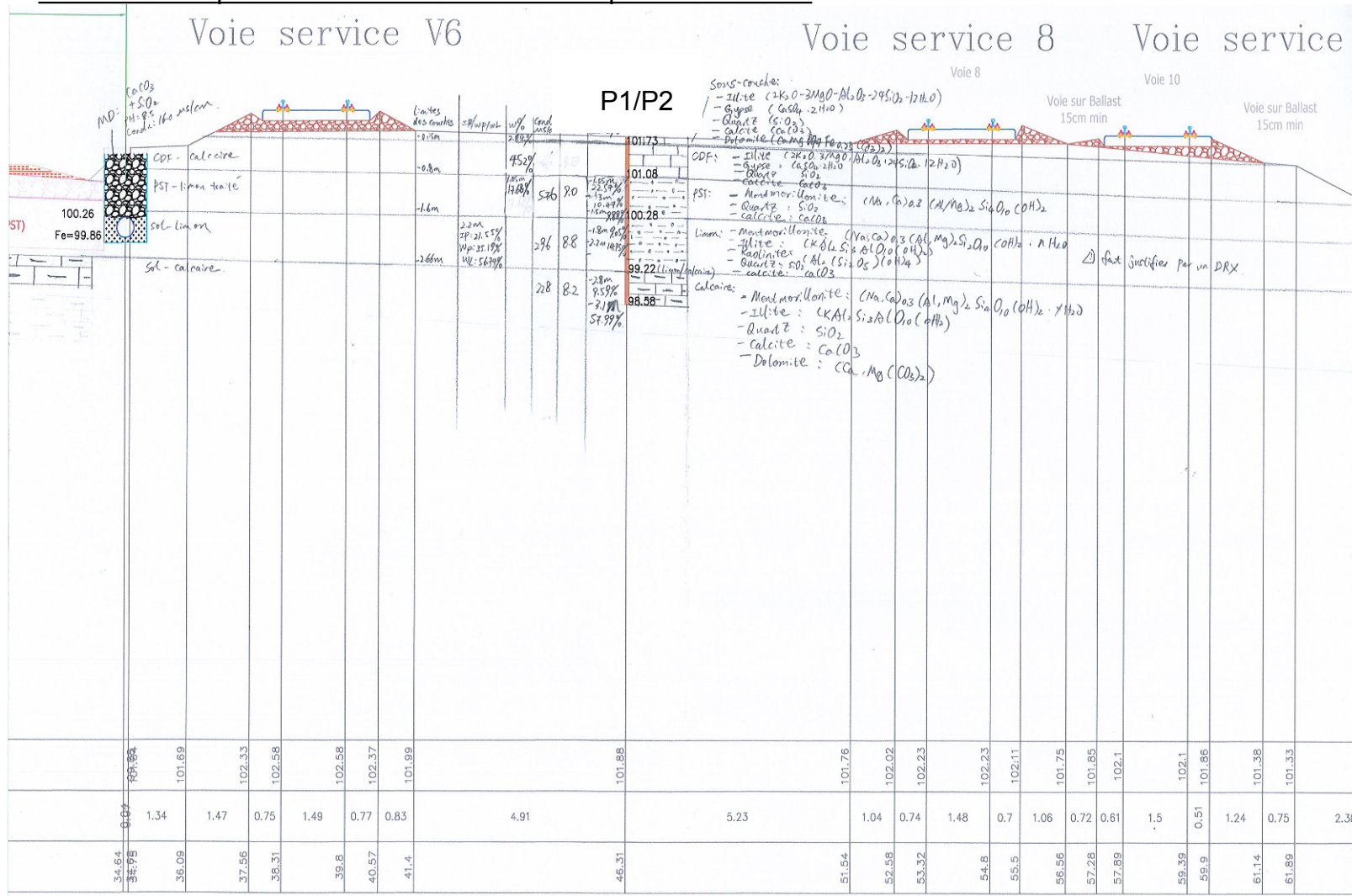
Zhang, J., Wang, H., Liu, Z., An, D., and Dreybrodt, W. (2012). Spatial–temporal variations of travertine deposition rates and their controlling factors in Huanglong Ravine, China – A world’s heritage site. *Appl. Geochem.* 27, 211–222.

Zhang, J., Wen, H., Qiu, Y., Zhang, Y., and Li, C. (2013). Ages of sediment-hosted Himalayan Pb–Zn–Cu–Ag polymetallic deposits in the Lanping basin, China: Re–Os geochronology of molybdenite and Sm–Nd dating of calcite. *J. Asian Earth Sci.* 73, 284–295.

Zhi, S., and Zhang, K. (2016). Hardness removal by a novel electrochemical method. *Desalination* 381, 8–14.

Zuddas, P., and Mucci, A. (1998). Kinetics of Calcite Precipitation from Seawater: II. The Influence of the Ionic Strength. *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 757–766.

Annexe1 : Coupes transversales de la voie à la position P1 et P2








## Annexe2 : Descriptions des carottes à la position P1, P2, et P3



Carotte P1 à la position de – 3,3m

Couches	Photos	Profondeur à l'interface (m)	Descriptions
Sous couche		-0,2	Bien compacté, sec, avec cailloux à l'échelle de 1 à 2 cm
CDF (couche de Forme)		-0,9	Compacté, mais légèrement fracturé, sec, avec cailloux à l'échelle de 1 à 2 cm
PST (partie supérieure de terrassement)		-1,4	Limons traités à la chaux 1 à 2%, légèrement humide, marron foncé, un peu fracturé
Sol support -limons		-3,2	Limons argileux ; marron ;
Sol support-Calcaire CSO		-3,3	Marneux ; marron claire à beige

Carotte P2 à la position de - 3,3m

Couches	Photos	Profondeur à l'interface (m)	Descriptions
Sous couche		-0,15	Fracturé, gris, légèrement humide, avec cailloux à l'échelle de 1 à 2 cm
CDF (couche de Forme)		-0,8	Pareil que la sous couche
PST (partie supérieure de terrassement)		-1,6	Limons traités à la chaux 1 à 2%, légèrement humide, marron foncé, bien compacté
Sol support -limons		-2.9	Limons argileux ; marron ;
Sol support-Calcaire CSO		-3,3	Marneux ; marron claire à beige

Carotte P3 à la position de – 8m

Couches	Photos	Profondeur à l'interface (m)	Descriptions
Sol – limons		-3.8	Limons humide, marron foncé, fracturé
Sol -Calcaire CSO		-8	Marneux beige



## Annexe3 : Diffractogrammes selon groupes de matériaux

### Sol des limons in situ

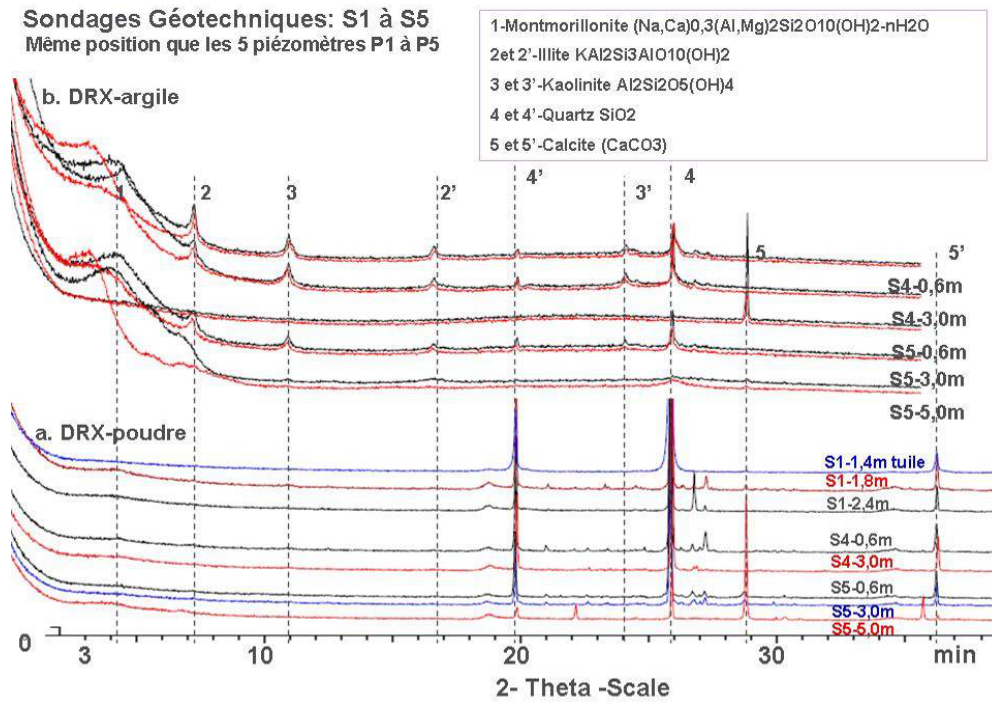


Figure 100 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons des limons

### Calcaire Saint Ouent

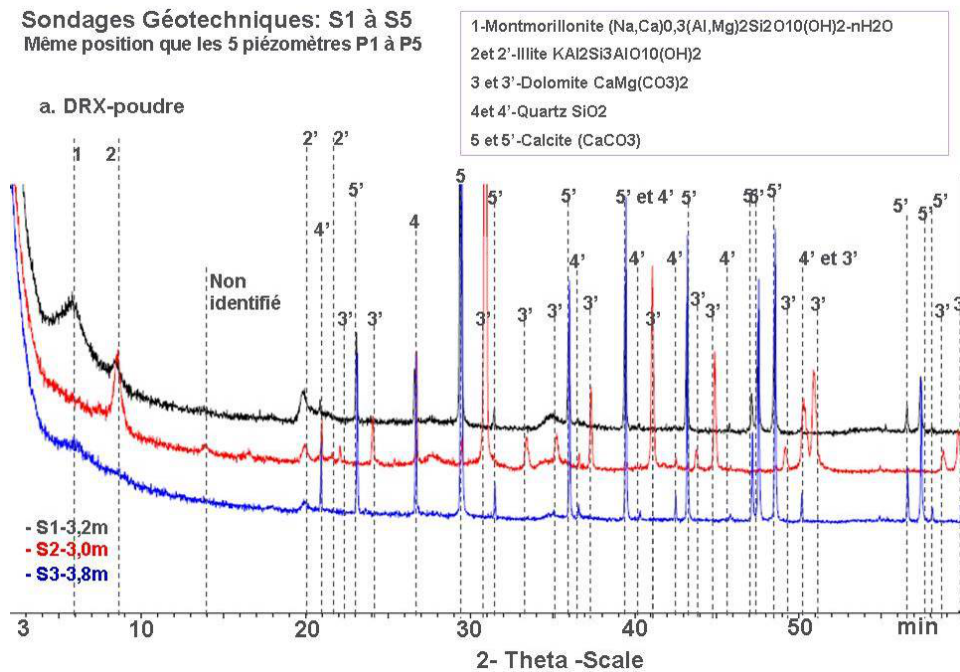


Figure 101 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons de Calcaire Saint Ouent

Sous couche et CDF

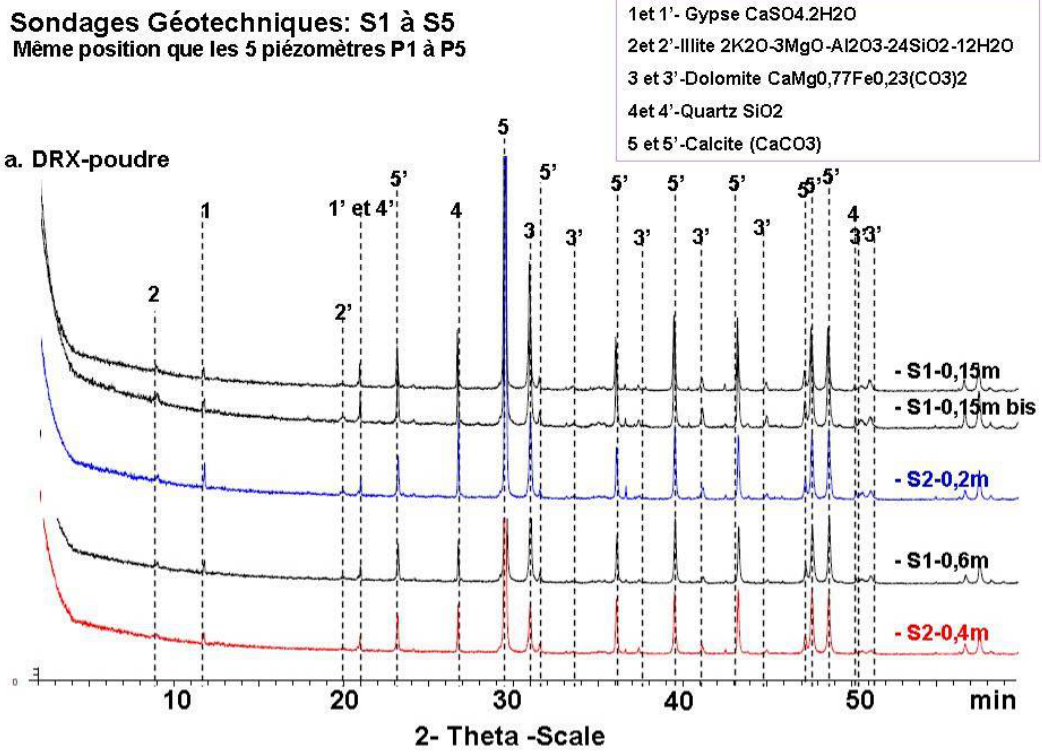


Figure 102 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons de la sous couche et CDF

PST- limons traités à la chaux de 1 à 2%

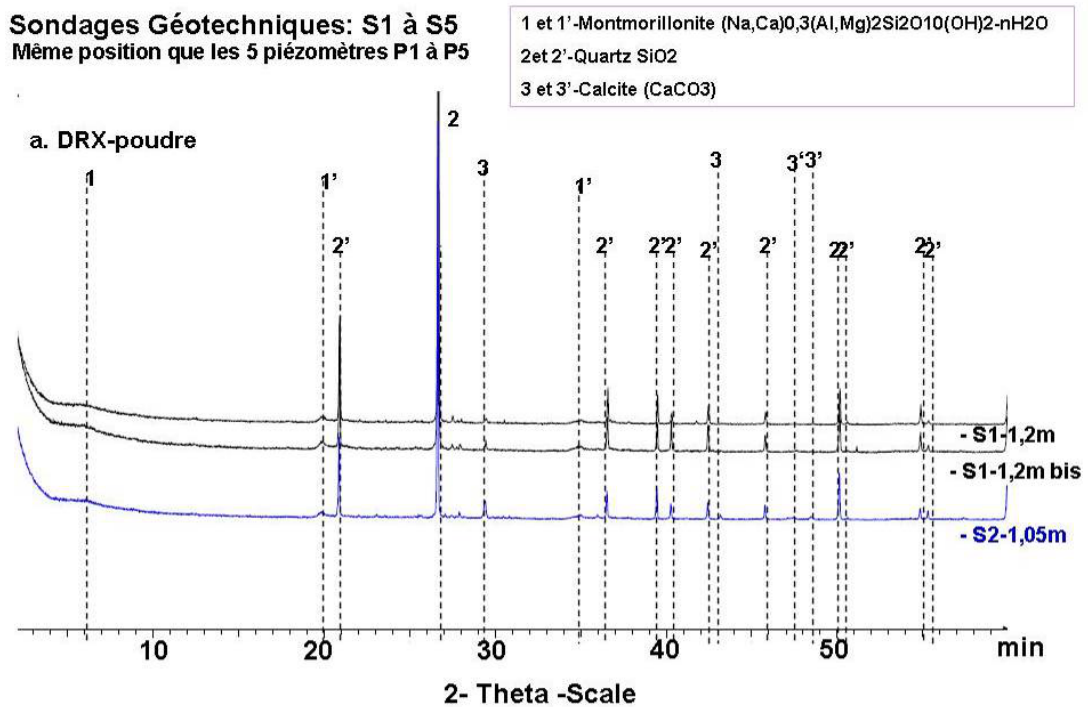


Figure 103 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons du limons traités



## Gravier cimenté

### a. DRX-poudre

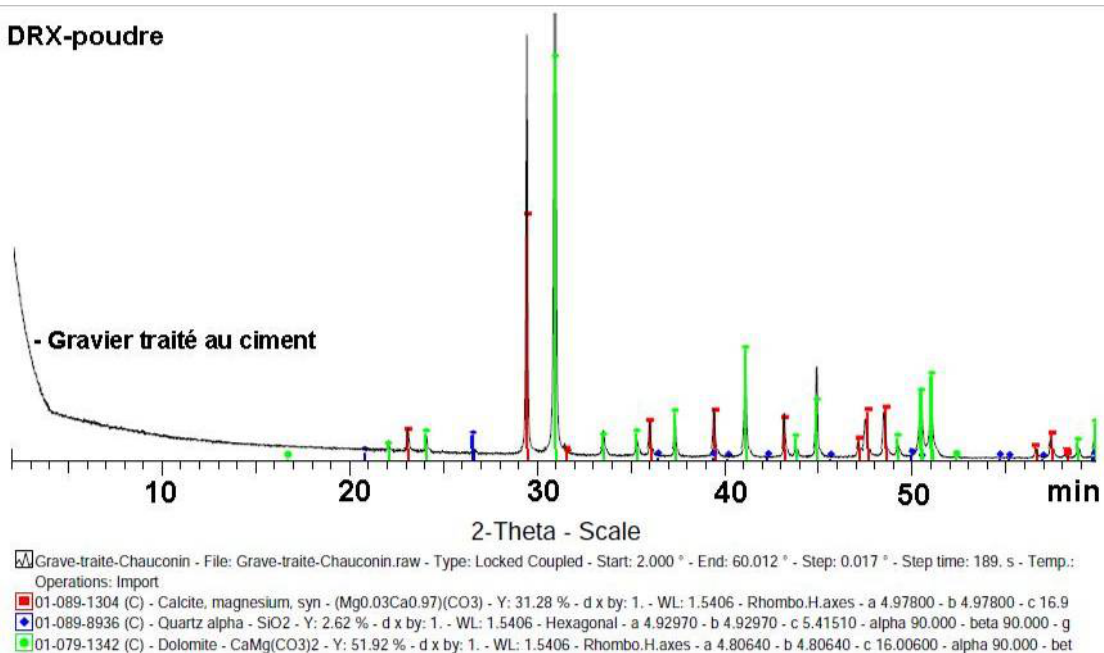


Figure 104 : Diffractogrammes de l'analyse des échantillons des graviers cimenté

## Matériaux drainants côté CD & Masque drainant côté FBPB

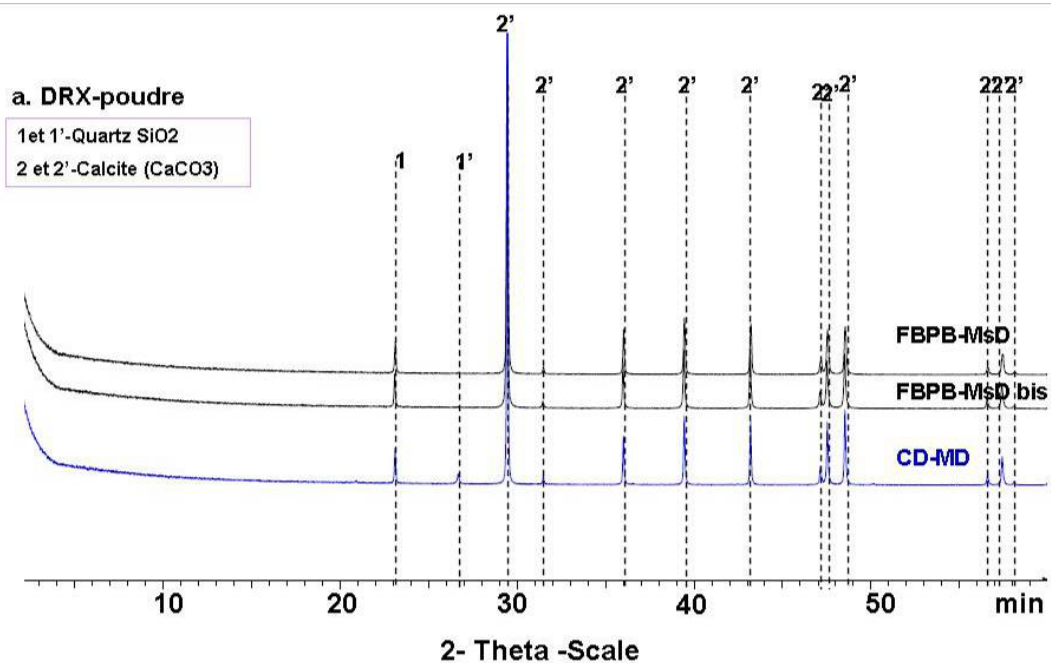


Figure 105 : Diffractogrammes des matériaux drainants côté CD et masque drainant côté FBPB

## Annexe 4 : Campagne d'analyse d'eau- Chauconin

Tableau 63: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10) – FBPB-FTR – 12/12/2013

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S1	8.93	9	1267	3.13E-04	2.62E-04	6.96E-03	3.59E-04	1.57E-05	2.11E-04	7.32E-06	1.68E-04	6.73E-03	6.82E-04	4.6	10.6
S2	9.17	8.3	1260	2.96E-04	2.37E-04	6.57E-03	5.28E-04	1.76E-05	1.94E-04	1.08E-05	1.61E-04	6.60E-03	7.47E-04	2.7	17.6
S3	9.3	8.2	1176	2.84E-04	2.37E-04	5.59E-03	3.80E-04	1.34E-05	1.79E-04	2.92E-06	1.22E-04	5.89E-03	1.06E-03	-5.5	29.8
S4	9.12	8.5	1120	2.80E-04	2.28E-04	5.91E-03	3.31E-04	1.23E-05	1.78E-04	5.07E-06	1.23E-04	5.83E-03	3.08E-04	5.5	6.5
S5	8.99	8.4	1114	2.78E-04	2.25E-04	5.43E-03	3.43E-04	1.63E-05	1.76E-04	1.12E-05	1.22E-04	5.75E-03	4.32E-04	-1.6	6.5
S6	8.85	8.4	1078	2.62E-04	2.12E-04	5.24E-03	3.97E-04	1.51E-05	1.63E-04	1.38E-05	1.18E-04	5.61E-03	3.89E-04	-1.5	4.2
S7	8.98	8.4	1185	2.33E-04	1.75E-04	5.74E-03	2.47E-04	1.35E-05	1.33E-04	6.39E-06	8.27E-05	5.93E-03	1.45E-04	1.2	2.2
S8	9.08	8.4	1128	2.23E-04	1.60E-04	5.98E-03	2.19E-04	1.18E-05	1.23E-04	0.00E+00	5.87E-05	6.17E-03	8.95E-05	1.3	1.7
S9	9.17	8.9	1211	2.22E-04	1.64E-04	6.19E-03	1.95E-04	1.32E-05	1.21E-04	0.00E+00	6.91E-05	6.16E-03	7.75E-05	4.3	1.9
S10	9.15	8.4	1190	2.23E-04	1.67E-04	5.98E-03	2.76E-04	1.38E-05	1.22E-04	5.84E-06	5.83E-05	6.31E-03	2.15E-04	-1.1	4.8
FBPB	7.89	4.5	910	4.45E-04	4.01E-05	3.80E-03	7.05E-04	1.68E-05	1.14E-03	0.00E+00	2.36E-04	2.32E-03	3.66E-03	-2.1	3.3
FTR	7.75	4.5	910	5.28E-04	1.56E-05	3.84E-03	4.86E-04	8.61E-05	1.18E-03	2.68E-05	3.08E-04	1.11E-03	5.40E-03	-0.3	3.8

NB: S1 à S10, FBPB et FTR sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 070/260/340/420/500/560/620/680/750/790, Pk 17 468/468

Tableau 64: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)– 02/06/2014

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S1	7.9	17.8	1093	2.64E-04	1.66E-04	5.73E-03	4.09E-04	1.88E-05	2.16E-04	0.00E+00	1.59E-04	5.94E-03	7.22E-04	-2.2	1.4
S2	7.81	15.8	1088	2.62E-04	1.68E-04	5.72E-03	4.76E-04	1.96E-05	2.06E-04	1.64E-06	1.57E-04	5.85E-03	8.97E-04	-1.2	1.3
S3	10.88	14.2	1199	2.60E-04	1.87E-04	5.40E-03	3.34E-04	1.70E-05	1.99E-04	1.05E-06	1.26E-04	5.24E-03	8.50E-04	2.2	191.2
S4	8.81	14.4	1001	2.67E-04	1.78E-04	5.16E-03	3.30E-04	1.81E-05	1.99E-04	1.01E-06	1.34E-04	5.30E-03	3.71E-04	0.8	4.7
S5	8.19	16.2	995	2.72E-04	1.75E-04	5.19E-03	3.28E-04	1.95E-05	2.01E-04	0.00E+00	1.36E-04	5.32E-03	3.88E-04	0.7	1.3
S6	10.94	17	1201	2.42E-04	1.67E-04	5.79E-03	1.62E-04	1.62E-05	1.73E-04	9.44E-07	1.03E-04	5.27E-03	1.05E-03	3.6	270
S7	10.59	13.8	1054	2.35E-04	1.64E-04	5.33E-03	1.52E-04	1.62E-05	1.68E-04	8.88E-07	1.02E-04	5.29E-03	3.58E-04	1.2	70.8
S8	10.52	15	1091	2.27E-04	3.39E-04	5.58E-03	1.19E-04	1.34E-05	3.13E-04	7.41E-07	8.93E-05	5.60E-03	2.47E-04	0.8	49.3
S9	10	13.9	1034	2.25E-04	1.66E-04	5.49E-03	1.45E-04	1.22E-05	1.55E-04	8.88E-07	8.87E-05	5.90E-03	1.83E-04	-4.7	21.3
S10	8.37	14.8	1005	2.29E-04	1.55E-04	5.40E-03	1.75E-04	1.45E-05	1.52E-04	8.96E-07	9.24E-05	5.45E-03	2.74E-04	0.7	1.4

NB: S1 à S10 sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 070/260/340/420/500/560/620/680/750/790

Tableau 65: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)– 19/11/2014

Concentration calculée en mol/l; BI%=( $\sum+$ - $\sum-$ )/( $\sum++\sum-$ )*200															
Endoits	pH	T°C	$\sigma$ - $\mu$ s/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	$\Omega$ -calcite
S1	8.52	13.3	1025	2.30E-04	1.41E-04	4.55E-03	9.07E-04	2.14E-05	1.81E-04	0.00E+00	1.38E-04	5.35E-03	4.79E-04	-2.0	2.7
S2	9.01	12.5	965	2.17E-04	5.27E-05	4.29E-03	5.72E-04	2.10E-05	1.65E-04	0.00E+00	1.21E-04	4.97E-03	3.30E-04	-5.7	5.2
S3	10.79	12.5	1002	2.19E-04	4.25E-04	4.26E-03	7.18E-04	1.95E-05	5.82E-04	0.00E+00	1.02E-04	4.81E-03	5.08E-04	-2.3	7.9
S4	10.01	12.5	933	2.18E-04	2.06E-04	4.13E-03	7.24E-04	1.93E-05	1.84E-04	0.00E+00	1.02E-04	4.80E-03	1.38E-04	0.9	12.8
S5	9.41	12.4	926	2.20E-04	1.64E-04	4.10E-03	6.66E-04	2.20E-05	1.57E-04	0.00E+00	1.04E-04	4.78E-03	2.05E-04	-1.4	7.1
S6	10.74	12.3	979	2.11E-04	2.30E-04	4.16E-03	6.82E-04	1.84E-05	1.52E-04	0.00E+00	9.09E-05	4.75E-03	4.58E-04	-1.0	77.6
S7	10.99	12.3	1013	2.06E-04	1.47E-04	4.53E-03	3.54E-04	1.72E-05	1.48E-04	0.00E+00	7.60E-05	5.02E-03	3.94E-04	-5.2	77.8
S8	11.03	12.5	1114	1.90E-04	1.66E-04	5.03E-03	6.32E-04	1.60E-05	1.44E-04	0.00E+00	6.37E-05	5.33E-03	3.46E-04	3.9	73
S9	10.83	12.3	1057	2.01E-04	4.65E-05	4.78E-03	4.57E-04	1.61E-05	1.49E-04	0.00E+00	6.67E-05	5.26E-03	4.80E-04	-4.7	92.8
S10	10.7	11.6	1049	2.03E-04	2.01E-04	5.25E-03	4.35E-04	2.10E-05	1.45E-04	0.00E+00	6.60E-05	5.35E-03	2.77E-04	4.9	53.6

NB: S1 à S10 sont à côté de la voie 2, respectivement au Pk 19 070/260/340/420/500/560/620/680/750/790

Tableau 66: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)- P1- P2-P5– 17/02/2015

Concentration calculée en mol/l; BI%=( $\sum+$ - $\sum-$ )/( $\sum++\sum-$ )*200															
Endoits	pH	T°C	$\sigma$ - $\mu$ s/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	$\Omega$ -calcite
P1	6.95	7.4	2720	1.44E-03	2.60E-03	1.26E-02	2.92E-03	1.90E-05	1.30E-03	4.54E-06	4.03E-04	1.64E-02	2.02E-03	-3.8	0.3
P2	7.06	8.9	2850	4.37E-04	8.50E-04	1.13E-02	7.12E-03	6.22E-05	1.31E-03	0.00E+00	7.88E-04	1.71E-02	2.84E-03	-2.7	0.5
P5	7.11	10	1075	6.81E-04	2.54E-04	4.18E-03	8.98E-04	1.38E-05	1.97E-03	1.76E-06	6.14E-04	1.13E-03	6.59E-03	-3.3	1.3
S9	9.74	7.3	1023	2.01E-04	2.09E-04	5.25E-03	3.03E-04	8.82E-06	2.44E-04	0.00E+00	4.49E-05	5.37E-03	3.46E-04	1.1	21.5

NB: S9, P1, P2 et P5 sont à côté de la voie 2, respectivement au Pk 19 750/320/420, Pk 17 425

Tableau 67: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)- FBPB- P1-P5- 17/03/2015

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S1	8.04	9.5	1210	2.30E-04	1.65E-04	6.36E-03	4.20E-04	1.81E-05	2.08E-04	0.00E+00	1.18E-04	6.61E-03	5.60E-04	-1.2	1.1
S2	8.2	8.8	1195	2.29E-04	1.62E-04	6.19E-03	4.19E-04	1.91E-05	2.05E-04	1.46E-05	1.17E-04	6.45E-03	6.69E-04	-2.3	7
S3	10.57	8.2	1143	2.30E-04	1.61E-04	5.53E-03	3.21E-04	2.10E-05	1.95E-04	1.49E-05	8.41E-05	5.81E-03	4.95E-04	-2.7	83.6
S4	8	7.9	1075	2.27E-04	1.55E-04	5.51E-03	3.14E-04	1.56E-05	1.93E-04	1.77E-05	7.70E-05	5.76E-03	4.57E-04	-2.1	0.6
S5	8.3	8.1	1085	2.27E-04	1.58E-04	5.51E-03	3.12E-04	1.57E-05	1.93E-04	1.51E-05	7.86E-05	5.78E-03	5.40E-04	-3.0	1.7
S6	10.7	8.1	1130	1.99E-04	1.36E-04	5.47E-03	1.52E-04	1.58E-05	1.69E-04	1.35E-05	6.47E-05	5.36E-03	5.86E-04	0.1	108.3
S7	9.8	8.3	1005	2.02E-04	1.32E-04	5.37E-03	1.39E-04	1.51E-05	1.66E-04	1.32E-05	6.45E-05	5.45E-03	2.40E-04	-0.4	17.5
S8	9.5	8.8	1100	1.97E-04	1.20E-04	5.74E-03	1.15E-04	1.47E-05	1.61E-04	1.48E-05	3.88E-05	5.77E-03	3.05E-04	-0.4	13.9
S9	9.7	8.1	1052	1.94E-04	1.30E-04	5.56E-03	1.18E-04	1.27E-05	1.61E-04	7.47E-06	5.89E-05	5.66E-03	2.65E-04	-1.3	16.5
S10	8.29	8.3	1407	1.93E-04	1.32E-04	5.43E-03	1.73E-04	1.34E-05	1.63E-04	1.39E-05	6.03E-05	5.66E-03	3.00E-04	-2.9	1
FBPB	8.04	8	810	3.71E-04	1.87E-05	3.71E-03	5.10E-04	1.53E-05	6.64E-04	2.45E-05	1.42E-04	1.44E-03	5.55E-03	-4.9	8.4
P1	7.6	10.4	2470	1.43E-03	1.62E-04	1.56E-02	2.06E-03	2.01E-05	4.33E-04	5.77E-05	3.72E-04	1.65E-02	2.22E-03	2.5	2.2
P5	7.47	12.2	1054	9.45E-04	3.63E-05	4.61E-03	8.48E-04	1.69E-05	2.10E-03	7.28E-06	6.48E-04	1.21E-03	6.57E-03	1.2	3.6
NB: S1 à S10, P1, FBPB et P5 sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 070/260/340/420/500/560/620/680/750/790/320, Pk 17 468/425															

Tableau 68: Campagne d'analyse d'eau du CD (S1 à S10)- CD (D503)-P5- 08/07/2015

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S1	7.74	18.2	1159	3.14E-04	1.80E-04	6.35E-03	1.89E-04	1.71E-05	4.00E-04	1.70E-05	1.79E-04	6.13E-03	6.86E-04	0.1	0.4
S2	7.86	19.2	1114	2.98E-04	1.78E-04	6.10E-03	1.99E-04	1.75E-05	3.88E-04	1.67E-05	1.76E-04	5.83E-03	7.25E-04	0.7	0.6
S3	7.74	17.5	1146	3.04E-04	1.18E-04	6.37E-03	2.45E-04	1.93E-05	3.88E-04	1.93E-05	2.06E-05	5.92E-03	1.25E-03	0.9	0.8
S4	7.86	18.3	1138	3.07E-04	1.12E-04	6.34E-03	2.89E-04	2.00E-05	4.02E-04	1.98E-05	1.94E-06	6.01E-03	1.15E-03	0.6	1.0
S5	7.9	18.9	1130	3.05E-04	9.44E-05	6.23E-03	2.88E-04	1.98E-05	3.89E-04	1.90E-05	6.44E-06	5.96E-03	9.99E-04	0.7	0.9
S6	7.85	19	1127	3.05E-04	9.89E-05	6.08E-03	3.48E-04	2.02E-05	3.87E-04	1.85E-05	9.66E-06	5.96E-03	8.34E-04	0.5	0.7
S7	7.8	17.6	1079	2.99E-04	1.07E-04	5.77E-03	4.90E-04	2.03E-05	3.84E-04	1.76E-05	1.52E-05	5.86E-03	6.69E-04	0.8	0.4
S8	7.73	17.3	1069	2.95E-04	1.15E-04	5.65E-03	5.20E-04	2.03E-05	3.82E-04	1.72E-05	2.39E-05	5.76E-03	6.64E-04	1.0	0.4
S9	7.76	17.6	1067	2.91E-04	1.24E-04	5.56E-03	5.10E-04	1.97E-05	3.70E-04	1.67E-05	4.12E-05	5.66E-03	6.64E-04	0.9	0.4
S10	7.87	17.5	1082	2.96E-04	1.50E-04	5.45E-03	7.01E-04	2.30E-05	3.57E-04	1.66E-05	4.72E-05	5.85E-03	5.44E-04	0.4	0.4
P5	7.41	12.7	1027	8.51E-04	3.30E-05	4.60E-03	7.97E-04	1.33E-05	2.03E-03	3.56E-05	6.16E-04	1.12E-03	6.52E-03	2.0	1.4
CDpk18720	8.22	17.7	578	5.86E-04	1.46E-05	2.28E-03	4.80E-04	1.28E-05	1.12E-03	1.44E-05	7.34E-06	1.12E-03	2.57E-03	2.2	2.8
NB: S1 à S10 sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 070/260/340/420/500/560/620/680/750/790/320															

Tableau 69: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)- flaque d'eau plateforme et route- 22/09/2015

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S9	9.9	16	919	2.09E-04	1.28E-04	4.24E-03	4.34E-04	2.48E-05	2.35E-04	0.00E+00	1.20E-04	4.82E-03	2.20E-04	182.5	7.9
Route	7.45	18.1	235	1.48E-04	5.65E-05	1.01E-03	4.13E-05	2.07E-05	1.08E-04	3.46E-06	1.39E-06	5.39E-04	1.06E-03	-64.7	0.1
Plateforme1	9.28	17.8	583	6.21E-05	6.03E-05	2.43E-03	3.27E-04	1.99E-05	2.02E-04	0.00E+00	0.00E+00	2.69E-03	2.90E-04	161.1	3.2
Plateforme5	7.6	17.3	600	7.88E-05	5.85E-05	2.37E-03	4.20E-04	2.20E-05	2.13E-04	6.24E-06	2.01E-06	2.70E-03	4.12E-04	147.2	0.1
NB: S9 (Pk 19 750), plateforme1 et 5 (~ Pk 19 500) sont à côté de la voie 2; route (~ Pk 18) est à côté de V1 hors zone du CD															

Tableau 70: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-pluie-03/12/2015

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S9	9.97	11.3	1122	2.28E-04	1.42E-04	5.67E-03	2.83E-04	1.32E-05	2.48E-04	1.20E-05	7.21E-05	6.08E-03	1.10E-04	-2.7	4.0
Pluie	8.52	10	52	7.34E-05	1.87E-04	0.00E+00	4.86E-05	0.00E+00	2.35E-04	0.00E+00	3.00E-05	5.54E-05	0.00E+00	-4.8	<1
NB: S9 (Pk 19 750)															

Tableau 71: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-P1-P5-Pluie- 22/01/2016

Concentration calculée en mol/l; BI%=(∑+ -∑-)/(∑++∑-)*200															
Endoits	pH	T°C	σ- μs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	Ω-calcite
S9	8.79	7.5	1116	2.24E-04	1.96E-04	6.49E-03	1.89E-04	1.06E-05	2.59E-04	1.48E-05	5.97E-05	6.86E-03	4.40E-04	-5.2	1.9
P1	6.71	8.2	2074	1.26E-03	4.47E-04	1.58E-02	3.07E-03	2.44E-05	1.60E-03	0.00E+00	6.79E-04	1.73E-02	1.40E-03	3.0	0.1
P5	8.86	11.5	960	6.42E-04	4.97E-04	4.13E-03	7.52E-04	1.17E-05	2.30E-03	2.05E-05	6.75E-04	1.03E-03	5.98E-03	-1.4	30.4
Pluie	8.38	5	54	2.12E-04	6.62E-04	2.41E-05	2.54E-05	0.00E+00	8.02E-04	0.00E+00	8.00E-05	6.79E-05	0.00E+00	-4.5	<1
NB: S9, P1 et P5 sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 750/320, Pk 17 425															

Tableau 72: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-Pluie- 19/02/2016

Concentration calculée en mol/l; BI%=( $\sum+$ - $\sum-$ )/( $\sum++\sum-$ )*200															
Endoits	pH	T°C	$\sigma$ - $\mu$ s/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	$\Omega$ -calcite
S9	9.75	8.1	1077	1.99E-04	1.33E-04	6.08E-03	3.48E-04	1.18E-05	2.70E-04	1.38E-05	5.29E-05	6.66E-03	1.70E-04	-4.8	4.8
Pluie	7.87	6.1	198	2.29E-04	1.08E-03	5.86E-05	2.62E-05	0.00E+00	1.32E-03	0.00E+00	7.30E-05	7.64E-05	0.00E+00	-4.6	<1

NB: S9 (Pk 19 750)

Tableau 73: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9)-P1-P5-23/03/2016

Concentration calculée en mol/l; BI%=( $\sum+$ - $\sum-$ )/( $\sum++\sum-$ )*200															
Endoits	pH	T°C	$\sigma$ - $\mu$ s/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	$\Omega$ -calcite
S9	8.58	8.3	1129	1.89E-04	1.64E-04	5.54E-03	2.40E-04	1.01E-05	2.99E-04	1.24E-05	3.61E-05	5.89E-03	3.43E-04	-4.7	0.8
P5	7.55	10.8	1085	7.67E-04	2.73E-05	4.40E-03	8.26E-04	1.17E-05	1.93E-03	3.18E-05	7.29E-04	1.11E-03	6.34E-03	-0.3	1.7
P1	7.37	9.4	3370	1.51E-03	3.24E-05	1.53E-02	3.42E-03	2.33E-05	1.15E-03	6.67E-06	6.14E-04	1.71E-02	2.41E-03	1.4	0.5

NB: S9, P1 et P5 sont à côté de la voie 2; respectivement au Pk 19 750/320, Pk 17 425

Tableau 74: Campagne d'analyse d'eau du CD (S9) suivi du pluie - 03/2016

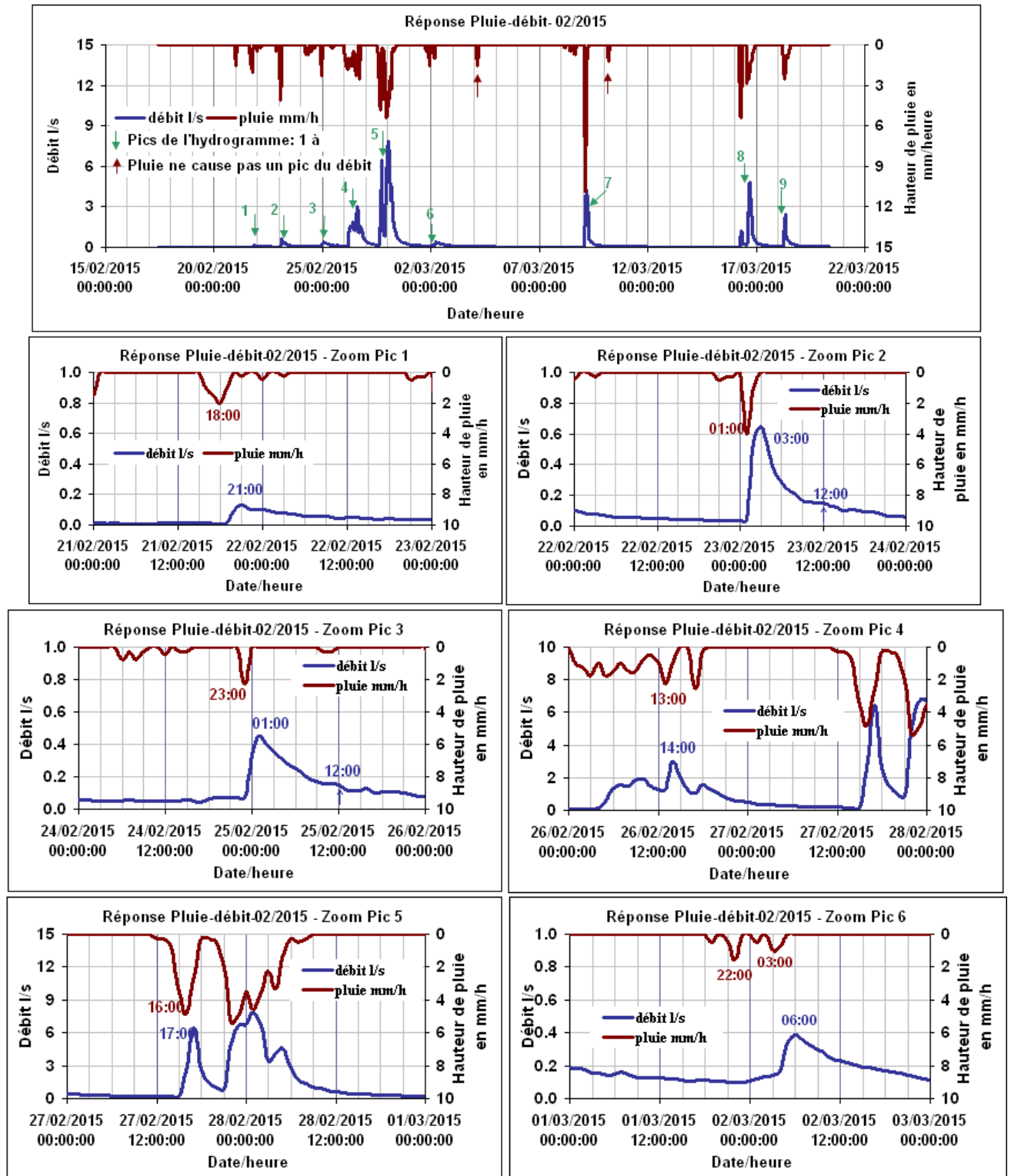
Concentration calculée en mol/l; BI%=( $\sum+$ - $\sum-$ )/( $\sum++\sum-$ )*200															
Endoits	pH	T°C	$\sigma$ - $\mu$ s/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	F-	Cl-	Br-	NO3-	SO42-	Alcalinité	BI%	$\Omega$ -calcite
S9-1	8.58	8.3	1129	1.89E-04	1.64E-04	5.54E-03	2.40E-04	1.01E-05	2.99E-04	1.24E-05	3.61E-05	5.89E-03	3.43E-04	-4.7	0.8
S9-2	9.04	8.2	1096	1.93E-04	1.27E-04	5.65E-03	2.80E-04	9.87E-06	2.59E-04	1.17E-05	3.87E-05	5.78E-03	4.30E-04	-1.2	3.2
S9-3	9.72	8.6	836	1.55E-04	7.91E-05	3.82E-03	1.86E-04	1.85E-05	2.32E-04	7.71E-06	6.15E-05	4.03E-03	1.95E-04	-3.8	4.4

NB: S9 (Pk 19 750); 1-23/03/2016 10:55; 2- 25/03/2016 10:40; 3-29/03/2016 18:17



## Annexe5 : Dynamique d'eau et cinétique du dépôt

### Réponse Pluie- débit du système du CD en hiver- Chauconin



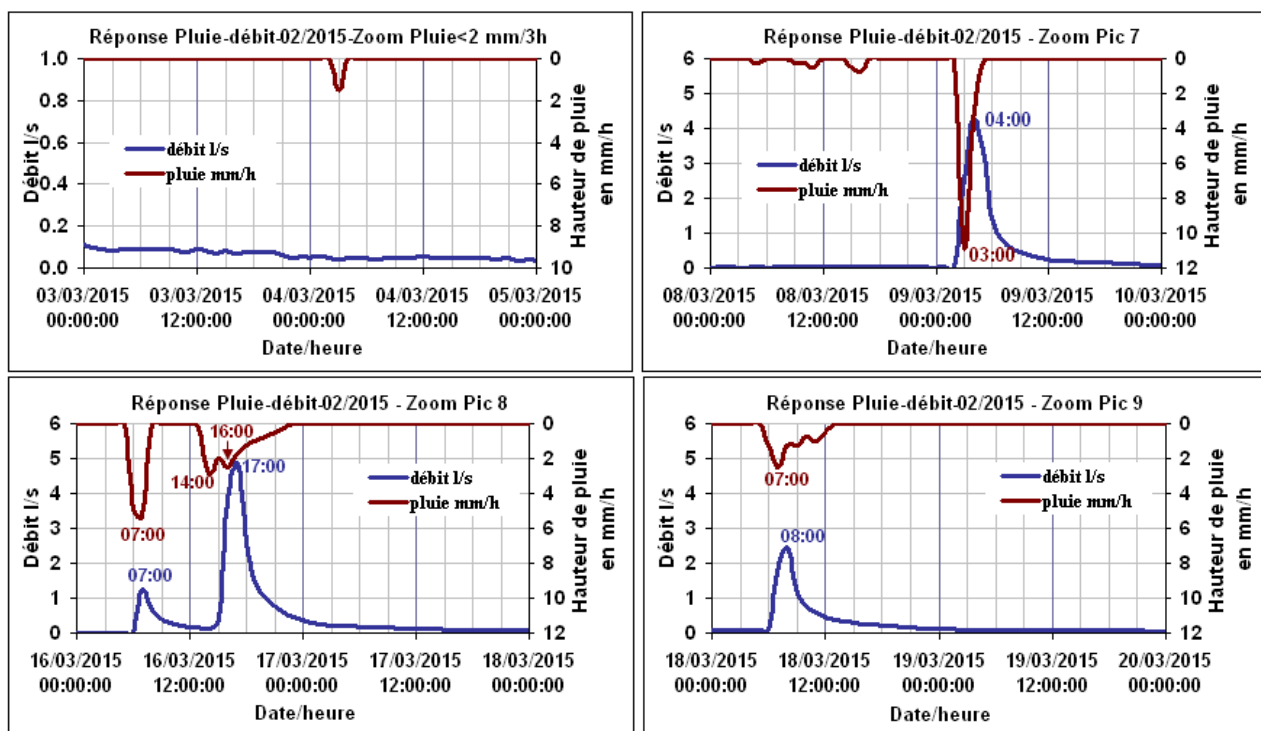


Figure 106 : Extraits Pluie-débit –zoom des 9 pics d'hydrogramme- 02/2015-Chauconin

### Mesures de la vitesse de la croissance de la calcite-Chauconin

Période	Somme de jours	Poids augmentés en g	Vitesse de la croissance $\text{mmol.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$
17/02/2015 ~ 17/03/2015	28	0.247	2.46E-08
17/02/2015 ~ 17/03/2015	28	0.3119	3.10E-08
26/03/2015 ~ 13/05/2015	48	0.3622	2.10E-08
26/03/2015 ~ 13/05/2015	48	0.4046	2.35E-08
13/05/2015 ~ 10/06/2015	28	0.0081	8.06E-10
10/06/2015 ~ 08/07/2015	28	0.0744	7.40E-09
08/07/2015 ~ 28/08/2015	51	0.0498	2.72E-09
28/08/2015 ~ 22/09/2015	25	0.1928	2.15E-08
22/09/2015 ~ 03/11/2015	42	0.2102	1.38E-08
03/11/2015 ~ 02/12/2015	29	0.4754	4.55E-08
02/12/2015 ~ 22/01/2016	51	0.4292	2.35E-08



## Annexe 6 : 8 sites flashs

### a) Mesures in situ

Site/éch.	pH	T°C	C25 µs/cm	Date éch.
Connerré-S1	7.9	16.8	511	17/09/2013
Connerré-S2	7.7	15.6	614	17/09/2013
Connerré-S3	7.4	15.4	616	17/09/2013
Soigolles -S1	8.08	12.9	901	04/04/2012
Soigolles -S2	7.64	13.3	962	04/04/2012
Soigolles -S3	7.5	12.7	987	04/04/2012
Soigolles -S4	8.13	10.6	856	04/04/2012
Marseille-PM461 joint v2	7.37	16.8	929	01/07/2014
Marseille-PM487 joint v1	7.31	15.6	947	01/07/2014
Marseille-PM487 amont v1	7.63	16.3	907	01/07/2014
Marseille-PM487 aval v1	7.53	16.1	916	01/07/2014
Marseille-PM541 joint v1	7.97	16.2	913	01/07/2014
Marseille-PM541 aval v1	7.83	15.7	920	01/07/2014
Marseille-PM706 joint v2	7.65	18.3	1211	01/07/2014
Marseille-PM756 joint v2	8.06	19.2	884	01/07/2014
Nantilly PM0V1 caniveau	7.65	14.6	714	30/06/2015
Nantilly PM39V1 parois	8.04	15.5	878	30/06/2015
Nantilly PM68V1 joints	8.05	15.7	595	30/06/2015
Nantilly PM82V1 caniveau	8.33	14.6	590	30/06/2015
Motte PM255V1 caniveau	7.92	12.7	534	18/06/2015
Motte PM255V2 parois	7.08	11.9	763	18/06/2015
Motte PM245V1 barbacanes	7.2	12.1	687	18/06/2015
Motte PM235V1 parois	7.91	13.4	642	18/06/2015
Motte PM165V2 parois	7.74	12.2	674	18/06/2015
Motte PM149V2 caniveau	8.08	12	509	18/06/2015
Motte PM49V2 caniveau	8.13	11.8	518	18/06/2015
Motte PM33V1 caniveau	8.17	11.7	567	18/06/2015
Bréval PM77V2 barbacanes	7.45	15.8	940	12/06/2015
Bréval PM68V1 caniveau	8.22	14.1	834	12/06/2015
Bréval PM68V1 barbacanes	7.34	11.4	925	12/06/2015
Bréval PM42V1 caniveau	8.12	12.4	831	12/06/2015
Bréval PM42V2 caniveau	8.32	12.9	674	12/06/2015
Bréval PM20V1 caniveau	8.15	12.8	801	12/06/2015
Bréval PM2V1 caniveau	8.19	13.1	780	12/06/2015
Caluire PM5centrale	8.3	12.7	836	26/05/2015

Site/éch.	pH	T°C	C25 µs/cm	Date éch.
Caluire PM12V2 parois	8.23	12.2	909	26/05/2015
Caluire PM21V1 parois	7.71	13.2	915	26/05/2015
Caluire PM47V2 joint	8.17	12.5	988	26/05/2015
Caluire PM78V1 joint	7.74	13.1	1125	26/05/2015
Caluire PM95V1 joint	8.26	12.6	939	26/05/2015
Caluire PM203V1 joint	8.22	12.5	762	26/05/2015
Caluire PM212V1 joint	8.1	12.9	1165	26/05/2015
Ramade PM123V1 caniveau	7.88	17.1	941	01/07/2015
Ramade PM118V1 parois	7.83	16.3	1074	01/07/2015
Ramade PM96V1 caniveau	8.08	16.6	914	01/07/2015
Ramade PM75V1 caniveau	8.05	16.4	907	01/07/2015
Ramade PM57V1 joint	7.83	16.4	963	01/07/2015
Ramade PM7V2 caniveau	7.81	19.8	790	01/07/2015
Ramade PM52V2 caniveau	8.17	17.84	708	01/07/2015
Ramade PM65V2 barbacane	7.11	19.4	786	01/07/2015
Ramade PM72 central	7.95	16.8	932	01/07/2015
Ramade PM96V1 joint	7.62	18.1	1078	01/07/2015
Ramade PM92V2 caniveau	8.29	17.6	688	01/07/2015
Ramade PM120 V2 joint	8.12	16.5	998	01/07/2015
Ramade PM122 central	8.03	16.9	868	01/07/2015
Ramade PM131V1 déblais sorie du tunnel	8.13	23.9	873	01/07/2015

Site/éch.	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Connerré-S1	2.69E-04	3.69E-05	2.80E-03	9.98E-05
Connerré-S2	2.69E-04	3.82E-05	2.79E-03	9.96E-05
Connerré-S3	3.96E-04	1.67E-05	2.22E-03	1.54E-04
Soigolles -S1	4.57E-03	6.65E-04	7.60E-03	1.30E-03
Soigolles -S2	3.13E-03	3.58E-04	7.30E-03	6.81E-04
Soigolles -S3	2.40E-03	2.45E-04	7.77E-03	6.86E-04
Soigolles -S4	2.75E-03	1.83E-04	6.39E-03	8.27E-04
Marseille-PM461 joint v2	8.28E-04	6.66E-05	3.71E-03	8.03E-04
Marseille-PM487 joint v1	9.55E-04	4.62E-05	4.07E-03	7.13E-04
Marseille-PM487 amont v1	9.36E-04	5.26E-05	3.57E-03	7.20E-04
Marseille-PM487 aval v1	9.44E-04	4.96E-05	3.58E-03	7.15E-04
Marseille-PM541 joint v1	9.62E-04	8.55E-05	3.55E-03	7.03E-04
Marseille-PM541 aval v1	9.44E-04	4.28E-05	3.62E-03	7.06E-04
Marseille-PM706 joint v2	2.39E-03	1.60E-04	3.49E-03	1.40E-03
Marseille-PM756 joint v2	1.18E-03	1.71E-04	2.87E-03	1.10E-03
Nantilly PM0V1 caniveau	7.43E-04	5.88E-05	3.25E-03	2.06E-04
Nantilly PM39V1 parois	5.68E-04	5.80E-05	3.97E-03	1.91E-04
Nantilly PM68V1 joints	5.71E-04	6.94E-05	2.06E-03	1.79E-04
Nantilly PM82V1 caniveau	9.16E-04	2.44E-04	2.02E-03	2.84E-04
Motte PM255V1 caniveau	4.15E-04	3.07E-05	2.55E-03	1.68E-04
Motte PM255V2 parois	3.17E-04	4.24E-05	3.07E-03	1.01E-04
Motte PM245V1 barbacanes	3.86E-04	2.93E-05	3.06E-03	1.24E-04
Motte PM235V1 parois	3.05E-04	6.55E-05	3.26E-03	1.34E-04
Motte PM165V2 parois	4.44E-04	5.88E-05	3.32E-03	1.72E-04

Motte PM149V2 caniveau	4.83E-04	3.56E-05	2.35E-03	1.85E-04
Motte PM49V2 caniveau	4.05E-04	3.57E-05	2.45E-03	1.28E-04
Motte PM33V1 caniveau	3.46E-04	2.87E-05	2.62E-03	1.24E-04
Bréval PM77V2 barbacanes	1.24E-03	8.32E-05	4.32E-03	4.56E-04
Bréval PM68V1 caniveau	1.16E-03	1.52E-04	2.53E-03	2.38E-04
Bréval PM68V1 barbacanes	7.80E-04	4.46E-05	3.24E-03	2.79E-04
Bréval PM42V1 caniveau	1.10E-03	1.40E-04	3.29E-03	4.21E-04
Bréval PM42V2 caniveau	8.02E-04	7.39E-05	2.60E-03	4.35E-04
Bréval PM20V1 caniveau	1.08E-03	1.43E-04	3.11E-03	4.36E-04
Bréval PM2V1 caniveau	1.08E-03	1.41E-04	2.97E-03	4.34E-04

## b) Cations en mol/l

Site/éch.	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Caluire PM5centrale	1.69E-03	6.62E-05	2.90E-03	2.92E-04
Caluire PM12V2 parois	1.48E-03	2.75E-04	2.56E-03	4.04E-04
Caluire PM21V1 parois	1.65E-03	5.48E-05	3.54E-03	2.75E-04
Caluire PM47V2 joint	1.78E-03	5.57E-05	3.83E-03	2.63E-04
Caluire PM78V1 joint	2.60E-03	4.87E-05	3.63E-03	2.81E-04
Caluire PM95V1 joint	2.53E-03	7.30E-05	3.27E-03	2.91E-04
Caluire PM203V1 joint	1.93E-03	3.75E-05	2.60E-03	1.85E-04
Caluire PM212V1 joint	4.01E-03	4.19E-05	3.66E-03	1.81E-04
Ramade PM123V1 caniveau	2.44E-03	8.07E-05	3.33E-03	5.49E-04
Ramade PM118V1 parois	2.40E-03	9.02E-05	4.14E-03	7.61E-04
Ramade PM96V1 caniveau	2.38E-03	5.39E-05	3.00E-03	4.72E-04
Ramade PM75V1 caniveau	2.17E-03	5.96E-05	3.31E-03	4.90E-04
Ramade PM57V1 joint	2.18E-03	6.20E-05	3.47E-03	4.94E-04
Ramade PM7V2 caniveau	1.39E-03	9.26E-05	2.94E-03	6.74E-04
Ramade PM52V2 caniveau	1.53E-03	8.33E-05	2.56E-03	3.06E-04
Ramade PM65V2 barbacane	1.62E-03	8.17E-05	2.63E-03	7.12E-04
Ramade PM72 central	2.34E-03	6.04E-05	3.10E-03	4.95E-04
Ramade PM96V1 joint	3.15E-03	3.64E-05	3.68E-03	4.94E-04
Ramade PM92V2 caniveau	1.52E-03	8.58E-05	2.23E-03	5.50E-04
Ramade PM120 V2 joint	2.34E-03	2.20E-04	3.35E-03	6.01E-04
Ramade PM122 central	2.34E-03	7.34E-05	2.82E-03	4.99E-04
Ramade PM131V1 déblais sortie du tunnel	2.41E-03	1.32E-04	2.48E-03	6.10E-04

## c) Anions en mol/l plus la BI%

Site/éch.	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Alc	BI%
Connerré-S1	3.97E-04	1.69E-03	2.30E-04	3.58E-03	-0.5
Connerré-S2	3.95E-04	1.71E-03	2.31E-04	3.56E-03	-0.8
Connerré-S3	7.41E-04	6.03E-04	2.50E-04	3.14E-03	3.5
Soigolles -S1	7.29E-03	3.34E-03	2.81E-03	4.13E-03	12.2
Soigolles -S2	5.01E-03	2.59E-03	2.24E-03	4.50E-03	15.9
Soigolles -S3	4.59E-03	3.50E-03	2.26E-03	5.02E-03	10.3
Soigolles -S4	4.96E-03	1.88E-03	2.06E-03	3.60E-03	17.5
Marseille-PM461 joint v2	9.57E-04	3.45E-04	1.07E-03	6.54E-03	-0.6
Marseille-PM487 joint v1	1.08E-03	4.36E-04	1.17E-03	6.23E-03	4.7
Marseille-PM487 amont v1	1.08E-03	4.46E-04	1.16E-03	5.65E-03	0.8

Marseille-PM487 aval v1	1.09E-03	4.44E-04	1.16E-03	5.82E-03	-0.8
Marseille-PM541 joint v1	1.11E-03	3.82E-04	1.11E-03	5.98E-03	-1.5
Marseille-PM541 aval v1	1.09E-03	4.29E-04	1.16E-03	5.55E-03	2.8
Marseille-PM706 joint v2	2.11E-03	1.02E-03	1.29E-03	7.06E-03	-3.6
Marseille-PM756 joint v2	1.20E-03	4.36E-05	1.63E-03	4.72E-03	0.6
Nantilly PM0V1 caniveau	7.39E-04	8.17E-04	6.32E-04	4.59E-03	4.0
Nantilly PM39V1 parois	4.68E-04	6.92E-04	9.09E-04	5.87E-03	1.1
Nantilly PM68V1 joints	5.17E-04	3.61E-04	4.17E-04	3.51E-03	-2.0
Nantilly PM82V1 caniveau	6.72E-04	1.45E-03	8.47E-04	1.97E-03	-0.3
Motte PM255V1 caniveau	4.79E-04	2.14E-04	1.29E-04	4.98E-03	-0.8
Motte PM255V2 parois	4.64E-04	1.19E-06	3.44E-04	5.60E-03	-0.8
Motte PM245V1 barbacanes	5.52E-04	2.50E-04	1.64E-04	5.88E-03	-3.3
Motte PM235V1 parois	5.11E-04	2.23E-04	1.25E-04	6.14E-03	0.5
Motte PM165V2 parois	5.86E-04	2.42E-04	1.86E-04	6.46E-03	-2.3
Motte PM149V2 caniveau	4.40E-04	1.49E-04	1.10E-04	4.56E-03	3.9
Motte PM49V2 caniveau	4.34E-04	2.14E-04	1.02E-04	4.90E-03	-2.6
Motte PM33V1 caniveau	2.58E-04	3.26E-04	1.03E-04	5.24E-03	-2.8
Bréval PM77V2 barbacanes	7.30E-04	5.81E-04	1.38E-03	6.52E-03	2.6
Bréval PM68V1 caniveau	8.64E-04	1.13E-03	8.31E-04	3.32E-03	-1.7
Bréval PM68V1 barbacanes	9.65E-04	1.24E-03	5.17E-04	4.58E-03	0.7
Bréval PM42V1 caniveau	1.36E-03	1.24E-03	9.59E-04	4.22E-03	-1.0
Bréval PM42V2 caniveau	9.66E-04	1.23E-03	7.52E-04	3.33E-03	-1.2
Bréval PM20V1 caniveau	1.35E-03	1.26E-03	9.50E-04	3.80E-03	0.1
Bréval PM2V1 caniveau	1.35E-03	1.25E-03	9.48E-04	3.57E-03	-0.4
Caluire PM5centrale	1.53E-03	1.29E-03	7.13E-04	3.54E-03	4.5
Caluire PM12V2 parois	1.76E-03	8.55E-04	5.81E-04	3.62E-03	4.0
Caluire PM21V1 parois	1.52E-03	1.35E-03	7.21E-04	4.93E-03	0.9
Caluire PM47V2 joint	1.64E-03	1.47E-03	7.57E-04	5.14E-03	2.6
Caluire PM78V1 joint	2.89E-03	1.37E-03	7.43E-04	5.19E-03	-4.3
Caluire PM95V1 joint	2.10E-03	1.25E-03	6.42E-04	4.83E-03	2.8
Caluire PM203V1 joint	2.06E-03	8.99E-04	6.79E-04	2.98E-03	3.1
Caluire PM212V1 joint	4.29E-03	9.52E-04	7.52E-04	4.47E-03	4.5

Site/éch.	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Alc	BI%
Ramade PM123V1 caniveau	1.88E-03	4.88E-04	1.02E-03	5.51E-03	3.6
Ramade PM118V1 parois	1.46E-03	1.71E-04	7.26E-04	8.52E-03	5.8
Ramade PM96V1 caniveau	1.96E-03	4.38E-04	9.77E-04	4.96E-03	0.7
Ramade PM75V1 caniveau	1.82E-03	4.56E-04	9.45E-04	5.33E-03	3.3
Ramade PM57V1 joint	2.04E-03	4.20E-04	9.71E-04	5.69E-03	0.7
Ramade PM7V2 caniveau	9.30E-04	7.74E-04	8.89E-04	5.10E-03	1.4
Ramade PM52V2 caniveau	8.87E-04	3.67E-04	7.19E-04	4.40E-03	3.4
Ramade PM65V2 barbacane	1.29E-03	3.15E-04	9.48E-04	4.88E-03	-0.1
Ramade PM72 central	1.84E-03	4.79E-04	9.14E-04	4.95E-03	5.3
Ramade PM96V1 joint	2.49E-03	4.01E-04	1.20E-03	6.08E-03	1.4
Ramade PM92V2 caniveau	1.13E-03	3.36E-04	8.51E-04	3.94E-03	0.8
Ramade PM120 V2 joint	1.94E-03	1.59E-04	9.77E-04	5.88E-03	5.2
Ramade PM122 central	1.81E-03	4.56E-04	9.64E-04	4.40E-03	5.2
Ramade PM131V1 déblais sortie du tunnel	1.94E-03	5.02E-04	9.65E-04	4.28E-03	0.8

d) 8 sites flashes – chimie d'eau de Nappe

Site	Soignolles	Connerré	Marseille	
Nappe	Calcaire de Champiny	Sable-nappe Cénomaniennne	Calcaire Kimméridgienne inférieure	Calcaire/argile Oligocène
pH	7,3	~7		
T°C	NR	NR		
C25 $\mu\text{S.cm}^{-1}$	NR	NR		
Na <sup>+</sup> mg/l	NR	11 à 19		
K <sup>+</sup> mg/l	NR			
Ca <sup>2+</sup> mg/l	36,5	100		
Mg <sup>2+</sup> mg/l		6		
Cl <sup>-</sup> mg/l	47	24,8		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	NR	25,2	17,8	30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	48	8,5		200
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> &CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> mg/l	106	152		
NE/TN en m	10 à 60	3 à 100	3,65 à 114	6,3 à 50
Type	Libre	Libre/captive	Libre	Captive/libre
Perméabilité m/s	10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-5</sup>		
transmissivité m <sup>2</sup> /s	NR	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-5</sup>		10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-5</sup>
débit l /s	2,5 à 55	0,5 à 55		1,5 à 40
Date	04/02/1968	1974	1974	1974
Réf.	ID BRGM- BSS 02207X0127/PZ14 &02206X0022/S1	(Bouillin et al., 1974) (BRGM, 2009) (Baudouin et al., 2009)	ID BRGM- BSS002KRMQ- 10434B0647/S6; BSS002KRMM- 10434B0644/S1; BSS002JLZB- 10208X0141/F; BSS002JLTY - 10208X0016/GL;	ID BRGM- BSS002JLYH - 10208X0123/PZ; BSS002KRLW- 10434B0448/111111 ; BSS002KWPF- 10441X0856/SC13 ; BSS002KTBF- 10434X0373/S

NB : NE/TN – niveau d'eau par rapport le terrain naturel ; NR – pas de données accessibles

Site	Nantilly	La Ramade	Bréval		La Motte	Caluire
Nappe	Calcaire du Séno-Turonien	Calcaire oligocène en aquitaine	Calcaire Brie	Calcaire Champigny	Craie Cénomaniennne / sableuse	Pliocène supérieur (argile sableuse)
pH	7,5 à 8,6					
T°C	NR	13 à 18				
C25 $\mu\text{S.cm}^{-1}$	NR	<600				
Na <sup>+</sup>	NR					
K <sup>+</sup>	NR					
Ca <sup>2+</sup>	80 à 132			140 à 160		
Mg <sup>2+</sup>						
Cl <sup>-</sup>	NR					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	> 50					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NR					
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> &CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NR					
NE/TN en m	5 à 25	5 à 20				
Type	Libre/captive	Libre/captive	Semi-captive	captive		
Perméabilité m/s	NR					
transmissivité m <sup>2</sup> /s	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-3</sup>		
débit l /s	5 à 300					
Date	2009					
Réf.	(Martin and Lalleron, 2009) (Baudouin et al., 2009)	<a href="http://sigesaqi.brgm.fr/Oligocene.html">http://sigesaqi.brgm.fr/Oligocene.html</a>				
NB : NE/TN – niveau d'eau par rapport le terrain naturel ; NR – pas de données accessibles						

## e) Descriptions détaillées des 8 sites flashes

Ce chapitre présente les résultats des différentes expérimentations réalisées sur les sites expérimentaux présentés précédemment. La première section du chapitre concerne le site de Chauconin, la seconde les analyses ponctuelles menées sur les 8 tunnels (sites flashes) présentés au chapitre 3.

Huit sites ferroviaires au site de Chauconin ont été étudiés en complément de l'étude de Chauconin où de la calcification a été observée: deux sites de pleine voie, Connerré et Soignolles en comparaison avec le caniveau drainant de Chauconin et six tunnels, à la fois sur les piédroits et dans les caniveaux de piédroit: Marseille, Le Motte, Nantilly, Bréval, Caluire et Le Ramade. L'étude des cinq derniers tunnels s'appuie sur un rapport de stage de M2 (ROUSSE, 2015) mené dans le cadre de la thèse.

Sur chacun de ces huit sites, une seule visite du terrain a été effectuée comprenant un échantillonnage de l'eau et des dépôts dans les fossés. Nous les nommons sites flashes pour cette raison. Les informations générales relatives à l'échantillonnage sont listées dans le tableau suivant (Tableau 75).

L'ensemble des résultats des analyses d'eau des huit sites flashes, y compris le bilan ionique (BI) sont présentés dans l'annexe 6. Concernant le bilan ionique, en dehors de l'analyse de Soignolles (erreur sur le bilan de 10%), toutes les autres analyses menées dans le cadre de la thèse donnent des erreurs sur les bilans inférieures à 5%, qui permettent des estimations thermodynamique et cinétique robustes.

Par la suite, les résultats des analyses sont présentés site par site, d'abord la chimie de l'eau, puis la chimie des dépôts. Le contexte de chaque site est préalablement présenté de manière synthétique avant les résultats.

**Tableau 75 : Synthèse des campagnes et types d'analyses pour les échantillons d'eau et de matériaux des 8 sites flashes**

Site	Type de drain	Nombre d'échantillon		Date campagne	pH-T°C-C25- Alcalinité- Cations-Anions	DRX - poudre
		eau	dépôt			
Connerré	CD	3	2	17/09/2013	oui	oui
Soignolles	CD	2	0	04/04/2012	oui	oui
	FBPB	2	0	04/04/2012	oui	oui
Marseille	Parois/fossé	4/3	2	01/07/2014	oui	oui
Le Motte	Parois/fossé	4/4	2	18/06/2015	oui	oui
Nantilly	Parois/fossé	2/2	6	30/06/2015	oui	oui
Bréval	Parois/fossé	2/5	2	12/06/2015	oui	oui
Caluire	Parois/fossé	7/1	2	26/05/2015	oui	oui
La Ramade	Parois/fossé	6/8	5	01/07/2015	oui	oui

## Soignolles

### 1. Localisation

Le déblai de Soignolles est situé au sud-est de la commune de Soignolles-en-Brie. Il est situé sur le tronçon d'interconnection entre les PK 30 et PK 31 de la ligne de grande vitesse 752 100 (Figure 107). Il est au sud de la rivière de l'Yerres.

### 2. Contexte du site

#### 2.1 Géologie et hydrogéologie

Le déblai, d'environ 2km de long, entaille le plateau de Brie (cf. feuille de Brie Compte Robert, Figure 107), sur une profondeur maximale de 10 m, en rive gauche de l'Yerres. Le déblai est terrassé dans des terrains marno-calcaires avec une pente de 3/1. Le talus côté Voie 1 a fait l'objet d'une visite, il comprend un masque superficiel d'un mètre d'épaisseur recouvert de terre végétale. Ses ouvrages drainants sont situés dans des terrains recouverts par des calcaires de Brie et des marnes.

En raison de la présence de nappes puissantes et de nappes perchées (SNCF, 2001) a été décidé d'équiper le site d'un caniveau drainant (CD) pour drainer ces eaux.

Les alluvions anciennes de l'Yerres renferment une nappe susceptible de fournir de bons débits, surtout dans la partie inférieure de son cours. Les argiles à meulières, peu perméables déterminent de nombreuses mares et des niveaux aquifères peu profonds et peu étendus. Dans les bancs fissurés du Calcaire et de la Meulière de Brie reposant sur l'horizon strictement imperméable des Marnes vertes, circulent en régime de grande perméabilité des eaux abondantes dont la présence est générale sur les plateaux, où elles alimentent de grands étangs et déterminent de nombreuses sources d'affleurement sur le flanc des vallées. Le CD in situ est supposé drainer l'eau de ce type de nappe perchée à la surface du sol calcaire marneux.

La nappe la plus puissante est celle du Calcaire de Champigny, dont les eaux sont en charge sous les Marnes bleues argileuses. Cette nappe aquifère alimente de nombreux forages publics et particuliers (cf. BRGM ID. BSS000RRME 02207X0127/PZ14). Le niveau de la nappe varie de 32 à 60 m de profondeur sous le terrain naturel, beaucoup plus profond que le niveau d'entrée d'eau du CD in situ. La dynamique annuelle est de janvier à août. Le battement est de l'ordre de 1,5 m à 3,5 m (BRGM, 2015). La pluie annuelle dans la zone est d'environ 700 mm.



## 2.2 Ouvrage d'art et Système de drainage

La ligne ferroviaire est en courbe à droite, avec un profil en travers à pente unique, voie 1 en coté haut (Figure 107). Le déblai est équipé de collecteurs drainants (CD) pentés du Sud (Lyon) vers le Nord (Lille) à environ 10 mm/m. Ces Collecteurs Drainants ont été mis en œuvre à la construction de la ligne (1994-1996) pour collecter l'eau qui ruisselle sur la plateforme et pour collecter l'eau souterraine afin d'éviter les remontées de nappe dans la plateforme. Des travaux de régénération ont eu lieu en 2011 pour la création d'un Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes (FBPB) en doublement du CD existant. Le FBPB est mis en œuvre parallèlement pour augmenter la capacité de drainage sur site.

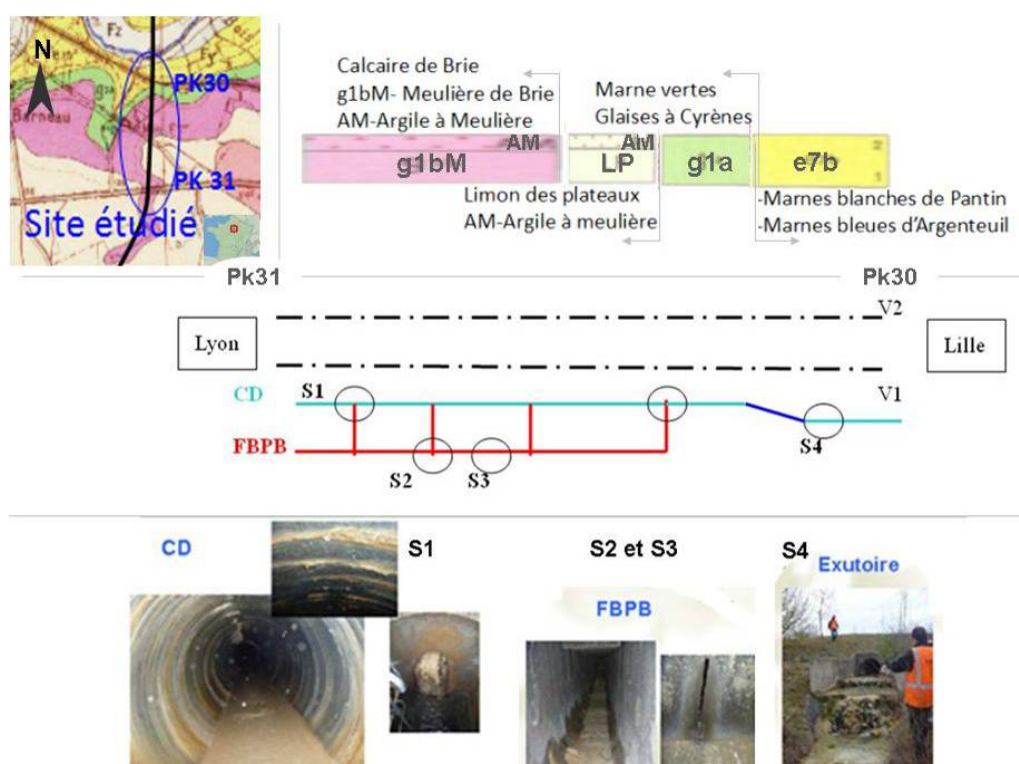


Figure 107: Schéma de principe du système de drainage et plan d'échantillonnage sur le site de Soignolles

Lors de ces travaux récents un masque drainant a été créé côté talus avec des matériaux calcaires en tant que matériaux drainant. Après environ six mois de mise en œuvre des FBPB, des concrétions calcaires ont commencé à précipiter dans l'ensemble du réseau (barbacanes à gauche côté talus sur la Figure 107, photos de S2 et S3). Les concrétions apparaissent dans quatre endroits principaux dans 'un CD: autour des fentes et au fond du CD; au fond des regards et à l'exutoire du réseau drainant. Ces concrétions peuvent à terme boucher les fentes des collecteurs drainants (CD).

### 2.3 Observation des visites de terrain

Le déblai de Soignolles se trouve sur la Ligne à Grande Vitesse Paris Sud-Est (Paris-Lyon). Ses ouvrages drainants se localisent dans des terrains qui sont recouverts par des calcaires de Brie et les marnes. Des Collecteurs Drainants (CD) ont été mis en œuvre à la construction de la ligne (1994-1996) pour collecter l'eau qui ruisselle sur la plateforme et pour collecter l'eau souterraine (éviter les remontées de nappe). Le CD est colmaté au niveau des fentes et au fond pour l'ensemble de son linéaire.

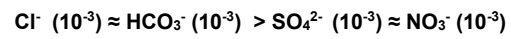
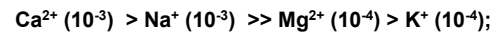
Des travaux de régénération du système de drainage le long de la voie ont eu lieu en 2011 pour la création d'un Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes (FBPB) en doublement du CD existant. Après environ 6 mois de mise en œuvre des FBPB, des concrétions calcaires ont commencé à précipiter dans le réseau. Les concrétions apparaissent dans 4 endroits principaux : autour des fentes ; au fond des collecteurs drainants ; au fond des regards et à l'exutoire du réseau drainant. Ces concrétions peuvent à terme boucher les fentes des collecteurs drainants. Le Fossé Béton Préfabriqué à Barbacanes est mis en œuvre parallèlement pour augmenter la capacité de drainage sur site.

Lors de ces travaux récents, un masque drainant a été créé côté talus avec des matériaux calcaires en tant que matériaux drainants. Ces matériaux drainants calcaires ont été lessivés et ont entraîné la formation des concrétions au fond du FBPB.

### 3. Analyse d'eau et dépôt

D'après la bibliographie : analyse d'eau datant du 04/02/1986 réalisée dans un forage proche du site (ID BRGM : BSS000RRME 02207X0127/PZ14, 1968), l'eau de la nappe du calcaire de Champigny a un pH de 7,3. La dureté de l'eau (TH) est de 36,5 mg/l ; l'alcalinité est de 106 mg/l ; la concentration en sulfate et chlorure est de 48 et 47 mg/l respectivement. L'ensemble des données bibliographiques relatives à la chimie des nappes présentent sur l'ensemble des sites flashs sont synthétisées dans l'annexe 7. Le site de Soignolles a été visité avant la thèse le 04/04/2012. L'échantillonnage liquide avait pour objet de connaître la thermodynamique de l'eau dans un premier temps. Les dépôts n'ont pas été échantillonnés à l'époque. D'après l'analyse d'eau, l'eau dans le CD a un faciès hydrochimique carbonaté de calcique. Au moment du prélèvement elle a un pH de 7,5 ( $\pm 0,2$  pH), une température entre 11 et 13 °C ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est entre 850 et 900 ( $\pm 25$ )

$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . L'eau dans le FBPB a un pH de 8,1 ( $\pm 0,2$  pH), une température de 13 °C ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est de 970 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs pour les deux échantillons sont listés dans l'ordre de concentration croissante. Le détail des analyses se trouve à l'annexe 6:



## Connerré

### 1. Localisation

Le déblai de Connerré se situe sur la ligne LGV qui relie Paris à Tours/Le Mans entre les PK 166 à 177 dans une zone de des champs agricoles. Le plan d'échantillonnage en superposant les photos du terrain sont illustrées dans la Figure 108. Les échantillons d'eau sont nommés de S1 à S3, dépôts sont nommés d'E1 à E4.

### 2. Contexte du site

#### 2.1 Géologie et hydrogéologie

La géologie de la zone est d'âge Crétacé supérieur et Jurassique. Les premiers 6 m du sol sont formés d'argile (<2,4 m) et de sable.

Une nappe est présente sur le site dans les sables, il s'agit de la nappe Cénomaniennne (Jia et al., 2016b). il s'agit d'une nappe présentant une faible variation saisonnière : de 0,5 à 1 m, avec une transmissivité variant de  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s du nord-ouest au sud. À l'inverse des nappes de la Craie ou du Jurassique qui sont plus transmissives mais moins capacitives (cf. <http://sigescen.brgm.fr/Fiche-d-identite-nappe-du-Cenomanien.html>).

La profondeur de la nappe varie de 3 à 100 m dans la région, et souvent captive (BRGM, 2009). Au niveau du site de Connerré, elle est peu profonde, quelques mètres proche de la surface du sol. La pluviométrie annuelle est de 600 mm.

#### 2.2 Ouvrage d'art et système de drainage

Le déblai est équipé d'un CD en béton avec des fentes de 2 mm de largeur. Son diamètre est de 400 mm. Le CD permet l'évacuation de l'eau du déblai (la nappe Cénomaniennne) et de ruissellement de la plateforme. Le CD côté voie 1 a un point haut au milieu au PK 177+ 055, puis évacue l'eau vers les deux exutoires d'extrémité : vers Paris et vers Le Mans. Il y a deux tronçon de CD côté voie 2 :

- tronçon 1 : du PK 166+821 au PK 167+096 (côté l'exutoire) ;
- tronçon 2 : du PK 176+263 (côté l'exutoire) au PK 177+038.

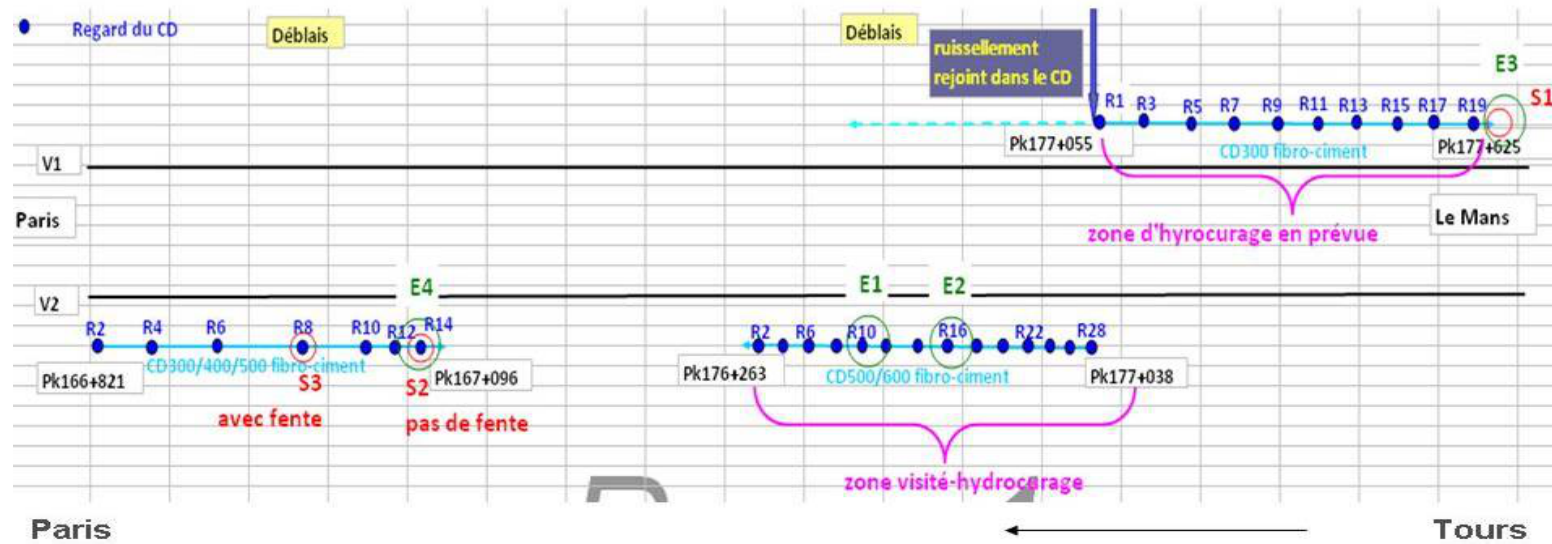


Figure 108: schéma de principe du système de drainage et plan d'échantillonnage sur le site de Connerré

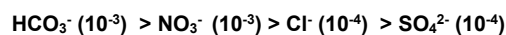
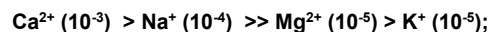
### 2.3 Observations

Du fait de la visite de terrain le 17/09/2013, on observe qu'il y a deux tronçons de CD sont colmaté : un est entre pK 176 – 178 côté de la voie 1 (de Paris à Tour) ; un autre est entre pK 166 à 167 côté voie 2 (Tours à Paris). L'accumule de concrétion est au niveau des fentes de 2 mm et au fond de CD où on trouve le joint de construction.

Les dépôts sont cimentés en grains, ont une couleur jaunâtre. Le CD est nettoyé par l'eau de haute pression (hydro curage) tous les ans. Pour déboucher un kilomètre de CD, il faut au moins d'un chantier de deux semaines.

### 3. Analyse d'eau et dépôt

L'eau de la nappe Cénomaniennne présente dans la zone a des caractéristiques chimiques suivantes (Bouillin et al., 1974) : le pH de 7 ; la dureté de 106 mg/l ; l'alcalinité de 153 mg/l ; sodium de 11 mg/l et potassium de 19 mg/l ; chlorure de 24,8 mg/l ; nitrate de 25,2 mg/l et sulfate de 8,5 mg/l Une campagne de terrain a été réalisée sur ce site le le 17/09/2013, des échantillons d'eau et de dépôts ont été prélevés et analysés. D'après l'analyse d'eau, l'eau dans le CD a un faciès hydrochimique d'hydrogénocarbonate de calcium avec un pH variant de 7,4 et 7,9 ( $\pm 0,2$  pH), une température entre 15 et 17 °C ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est entre 500 et 620 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs sont listés dans l'ordre de concentration croissante, le détail des analyses se situe en annexe 6:



Les dépôts dans cette zone est visuellement jaune-marron, granuleux et sableux ( Figure 109). Deux échantillons sont prélevés Un est échantillonné dans le regard de CD côté voie 2 au PK167, l'autre à l'exutoire du CD côtévoie V1 au Pk 177+500. Les échantillons de dépôt sont analysés par DRX en poudre. D'après cesanalyses les phases minérales détectées dans les dépôts précipités au PK 167 sont le gypse, le quartz et la calcite. D'après l'analyse calcimétrique, la calcite occupe 30 à 55% de la masse totale pour cet échantillon. Pour l'échantillon du PK 177+500, les phases détectées sont la calcite et quartz. L'analyse calcimétrique indique que la calcite est de 80% de la masse totale. La déférence de pourcentage des phases carbonatées dans les deux dépôts souligne une dégradation de béton au niveau du regard au PK 167.

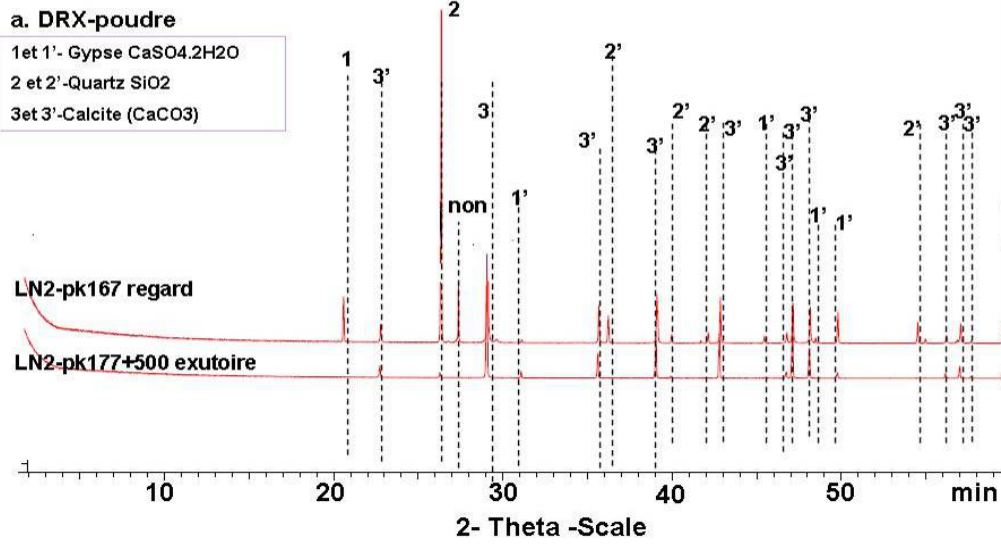


Figure 109: Analyse DRX- dépôts carbonatés dans le CD sur le site de Conneré

## Tunnel de Marseille

### 1. Localisation

Le tunnel de Marseille est situé sur la LN6 (LGV branche de Valence à Marseille), sa longueur est de 5414 m. Il est situé entre le tunnel des Pennes Mirabeau (1530 m), et une tranchée couverte de 490 m. Il est situé en zone urbaine.

### 2. Contexte de site

#### 2.1 Géologie

Les informations sur la géologie locale sont issues des données BRGM (infoterre) et de la carte BRGM au 1/25 000. Le tunnel de Marseille (Figure 110) est localisé dans différentes couches géologiques de côté des Pennes – Mirabeau au côté de Marseille (cf. Notice BRGM 1020N et 1044N): Calcaire Clansayésien (n6b) et Marne Bégudien (C7aP) enfermées dans Colluvions Wurmiennes (Cy), Calcaire Bédoulien (n5), Calcaire Jurassique moyen (n6U), Hauterivien (n3), Calcaire Valanginien (n2b), Dolomite Portlandien (J9D), Dolomite Kimméridgien supérieur (j8D), Calcaire Callovien (j3-6), Calcaire Bajocien (j1-2), Calcaire/dolomite Kimméridgien inférieur (j7), Calcaire Kimméridgien (j7-8) et Dolomie Portlandien (j9a) en alternance, calcaréo-dolomie Portlandien (j9b) et Calcaire Sannoisien (g1).

La géologie du site est complexe du fait de l'histoire tectonique de la région. L'encaissant est parcouru de plissements, chevauchements et de failles.

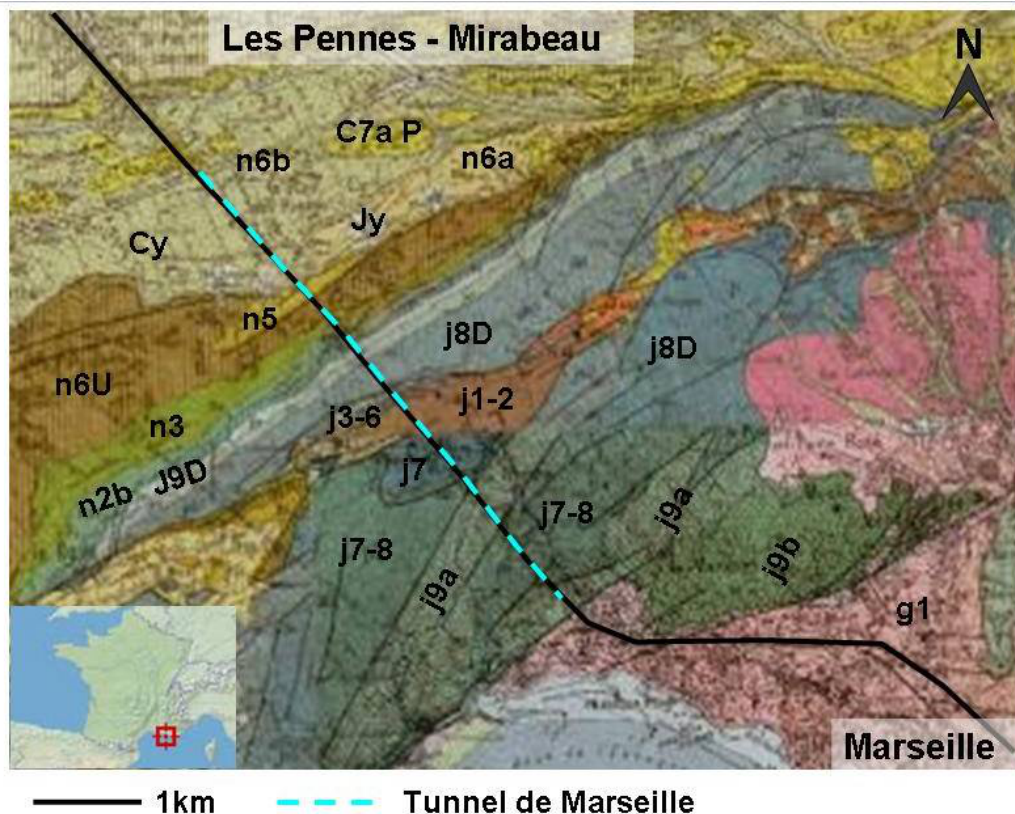
n6b. Ce sont des calcaires gréseux, glauconieux (silicate riche en fer) pouvant être recouvertes par déformations marno-calcaires glauconieuses.

C7aP. Cette formation marneuse se compose de smectite et localement attapulgite qui sont des argiles minérales (silicates). Cette formation contient des galets variés : calcairénites et calcaire gréseux, souvent glauconieux, grès, et quartz. Au niveau du tunnel de Marseille, cette formation est accompagnée localement d'argiles et de calcaires rouges.

Cy. Cette formation est surtout constituée de limons soliflués.

n5. Les faciès de ce sous-étage sont variables suivant leur localisation dans la zone de calcaires marneux aux calcaires siliceux. Au niveau du tunnel de Marseille, cette formation est un calcaire siliceux.





- n6b. Clansayésien : faciès Calcaire gréseux ou à spicules.
- C7aP. Bégudien : faciès de poudingues et marnes.
- Cy. Colluvions wurmiennes : faciès limoneux.
- n5. Bédoulien : faciès calcaires marneux ou siliceux.
- n6U. Jurassique moyen : faciès calcaires et marno-calcaires.
- n3. Hauterivien : faciès calcaire ou dolomite.
- n2b. Valanginien : faciès calcaires.
- J9D. Portlandien : faciès dolomitisés.
- j8D. Kimméridgien supérieur : faciès dolomitique.
- j3-6. Callovien et Oxfordien : faciès calcaires argileux.
- j1-2. Bajocien et Bathonien : faciès calcaires argileux ou marneux.
- j7. Kimméridgien inférieur : faciès calcaire ou dolomite.
- j7-8. Kimméridgien : faciès calcaire.
- j9a. Portlandien : faciès dolomitique.
- j9b. Portlandien : faciès calcaréo-dolomitique.
- g1. Sannoisien : faciès calcaire.

Figure 110: Carte géologique du tunnel de Marseille (BRGM, 1/25 000)

n6U. Cette formation se compose de calcaires et marno-calcaires.

n3. Les faciès de cette formation sont très variés selon les secteurs dans la région : calcaire ferrugineux à cassure spathique, formation dolomitiques ou une alternance de calcaires noduleux et de calcaires légèrement marneux. Au niveau du tunnel de Marseille, il s'agit d'un calcaire marneux.

n2b. Cette formation est composée essentiellement de calcaire et est marquée par un terrain ferrugineux.

J9D. Cette formation est entièrement dolomitisée.

j8D. Ce sont des dolomies gris sale. La couche d'altération peut être sableuse.

j3-6. C'est une formation de calcaires argileux.

j1-2. Cette formation se compose de calcaires argileux ou marneux.

j7. Cette formation peut être une couche de calcaire, dolomite ou mixture des deux (Arlhac, 1977).

j7-8. Cette formation est un calcaire beige ou gris à pâte très fine.

j9a. Ce sont généralement des dolomies grises, parfois riches en matières organiques. La couche sableuse peut être une couche d'altération.

j9b. Cette formation présente une alternance de gros bancs de calcaires à pâte fine et à lits dolomitiques.

g1. Cette formation est généralement très calcaire. En certains points, elle se compose des petits lits de grès ou d'argile verte. Des niveaux irréguliers de gypse cristallisé se rencontrent à Saint Victor (dans la ville de Marseille).

En résumé, le terrain autour de tunnel de Marseille est très riche en calcium qui peut être trouvé dans les calcaires, les dolomites, les marnes ou le gypse.

## 2.2 Hydrogéologie

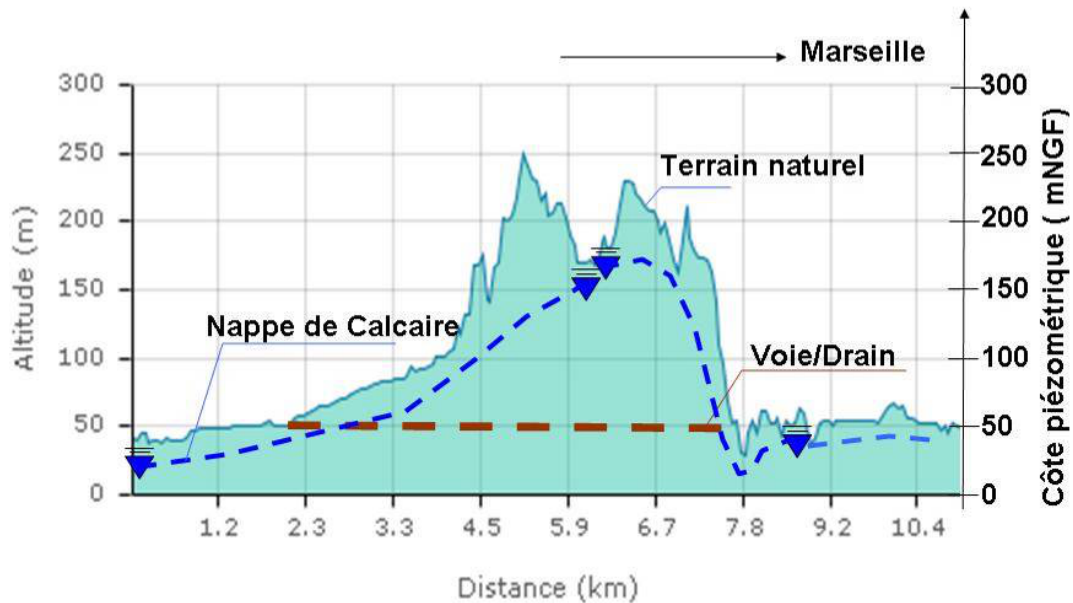
D'après les informations du BRGM, à la sortie nord (côté des Pennes- Mirabeau), un glissement de terrains s'est produit en 1991 (cf. BRGM 61300271). Dans cet côté et 2 km après cette sortie nord, le terrain au tour de tunnel a un fort risque de retraits-gonflement. 300 mètres après la sortie sud (côté de Marseille) du tunnel, il y a eu un éboulement (cf. BRGM 61300674) et deux coulées (cf. BRGM 61300266 ; 61300269) dans cette zone. Toutes ces anomalies de mouvement du terrain au tour de tunnel soulignent la présence d'écoulement dans le sol autour du tunnel.

D'après la carte géologique dans cette zone (cf. Notice BRGM 1020N), les dolomies et les calcaires jurassiques de la partie orientale de la Nerthe constituent des aquifères importants avec des niveaux hydrostatiques élevés. Sous son faciès d'alternance de calcaires et de marnes, le Bégudien ne nourrit qu'une petite source d'eau.

Parmi les sondages géotechniques et forages effectués près du tunnel de Marseille (dans un rayon  $\leq 1$ km), quatre forages dont les données sont accessibles ont été effectués dans la zone : un à la sortie nord du tunnel (cf. BRGM BSS002JLLF), un à la sortie sud (cf. BRGM BSS002KSLG) et deux au centre du tunnel (cf. BRGM BSS002KRDB ; BSS002KRDC). D'après les niveaux d'eau ponctuels mesurés dans ces quatre forages, les niveaux d'eau fluctuent spatialement avec des cotes piézométriques différentes : à 3m de profondeur près de la surface au niveau de la sortie nord, à une dizaine de mètres de profondeur au centre et à une trentaine de mètres à la sortie sud (la Figure 111). D'après cette figure, on observe que le drain schématisé au piedroit du tunnel de Marseille draine l'eau de la nappe calcaire tout au long du tunnel.

Deux qualimètres (cf. BRGM BSS002KRDB ; ADES 10212X0029) se situent dans la zone. Ils permettent de connaître la chimie de l'eau souterraine localement. L'eau captée est l'eau des calcaires argileux, et son débit capté est de 21 l/s. Comme il n'y a pas assez de données d'eau souterraine permettant de faire une comparaison par une boîte à moustache, on choisit d'utiliser la valeur moyenne des mesures afin de comparer l'eau de l'encaissant et l'eau prélevée dans le drain du tunnel de Marseille. Les détails sont synthétisés dans le Tableau 76.

D'après ce tableau, on observe que l'eau souterraine dans la région est carbonatée calcique. Par contre, l'eau mesurée dans le piézomètre de rayon plus que 20 km (ADES 10212X0029) à partir du centre du tunnel de Marseille est beaucoup moins chargée que l'eau retrouvée dans le forage au centre du tunnel (cf. BRGM BSS002KRDB). Cette différence de chimie est liée au passage d'une géologie de calcaire dolomitique tel que la formation encaissante au centre du tunnel à celle d'un calcaire sableux (20km à l'est du centre de tunnel). L'eau prélevée dans le drain au piedroit du tunnel de Marseille est moins chargée que celle souterraine in situ. Surtout, il y a plus de nitrates dans l'eau interne du tunnel que dans l'eau du sol externe du tunnel, mais beaucoup moins des autres ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ ). La haute concentration en nitrates dans l'eau du tunnel souligne le mélange de l'eau de surface (ex : l'infiltration ou une nappe perchée en surface) et de la nappe de souterraine de calcaire.



▼ Niveau d'eau trouvé dans les piézomètre

Figure 111: Coupe schématique du site de du tunnel de Marseille (d'après IGN et BRGM)

Tableau 76: Comparaison de la chimie des eaux souterraines avec l'eau dans le tunnel de Marseille

Moyenne	pH	T° C	C25 us/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Cl-	NO3-	SO42-	Alc	Date éch.
tunnel centre	7.6	16.	922	9.28E-04	5.72E-05	3.68E-03	7.27E-04	1.07E-03	4.14E-04	1.14E-03	5.96E-03	01/07/2014
piezometre centre	7.3	13.		4.13E-03	1.13E-04	5.28E-03	3.92E-03	4.23E-03	3.23E-06	4.69E-03	7.60E-03	06/11/1978
piezometre R>20km	7.7	14.		5.00E-04	0.00E+00	2.40E-03	4.58E-04	7.89E-04	0.00E+00	5.63E-04	4.07E-03	02/11/1967

NB: la concentration des ions sont enmol/l

## 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

### Système du drainage

Dans le tunnel, l'eau qui s'infiltre ou circule dans l'extrados autour des bétons massifs est collectée et drainée par le caniveau en béton au pied de chaque côté du tunnel. L'eau dans le caniveau se coule de la tête du tunnel vers la fin du tunnel. Le caniveau de piedroit en béton, avec des couvercles en avec desfentes espacées tous les trentecentimètres environ. Ces fentes laissent l'eau contacter avec l'atmosphère (

Figure 112: Caniveau du Tunnel de Marseille au PM 436-V1

). Du PM 170 au PM 278, la pente du caniveau est de 0,9%. Ensuite, la pente s'accroît à 2,5% jusqu'à la fin du tunnel (PM 734).



Figure 112: Caniveau du Tunnel de Marseille au PM 436-V1

#### 2.4 Observation de la visite de terrain

Du fait de visite de terrain dans la nuit du 01/07/2014, on observe que :

- Du PM 344 au PM 500, c'est la zone où il y a des fortes fissurations et des venues d'eau : Il y a des arrivées d'eau aux locaux des joints de construction où il y a dépôts de calcite et celui ferriferréux. Il y a aussi des sorties d'eau sur le mur de béton où les dépôts de calcite et ferriferréux s'apparaissent ;
- Dans certaines zones, l'eau déborde au niveau de la plateforme ;
- Du PM 500 au PM 756, c'est la zone de forte calcification dans les caniveaux.



Figure 113: Sachet de pastilles dans le caniveau du tunnel de Marseille

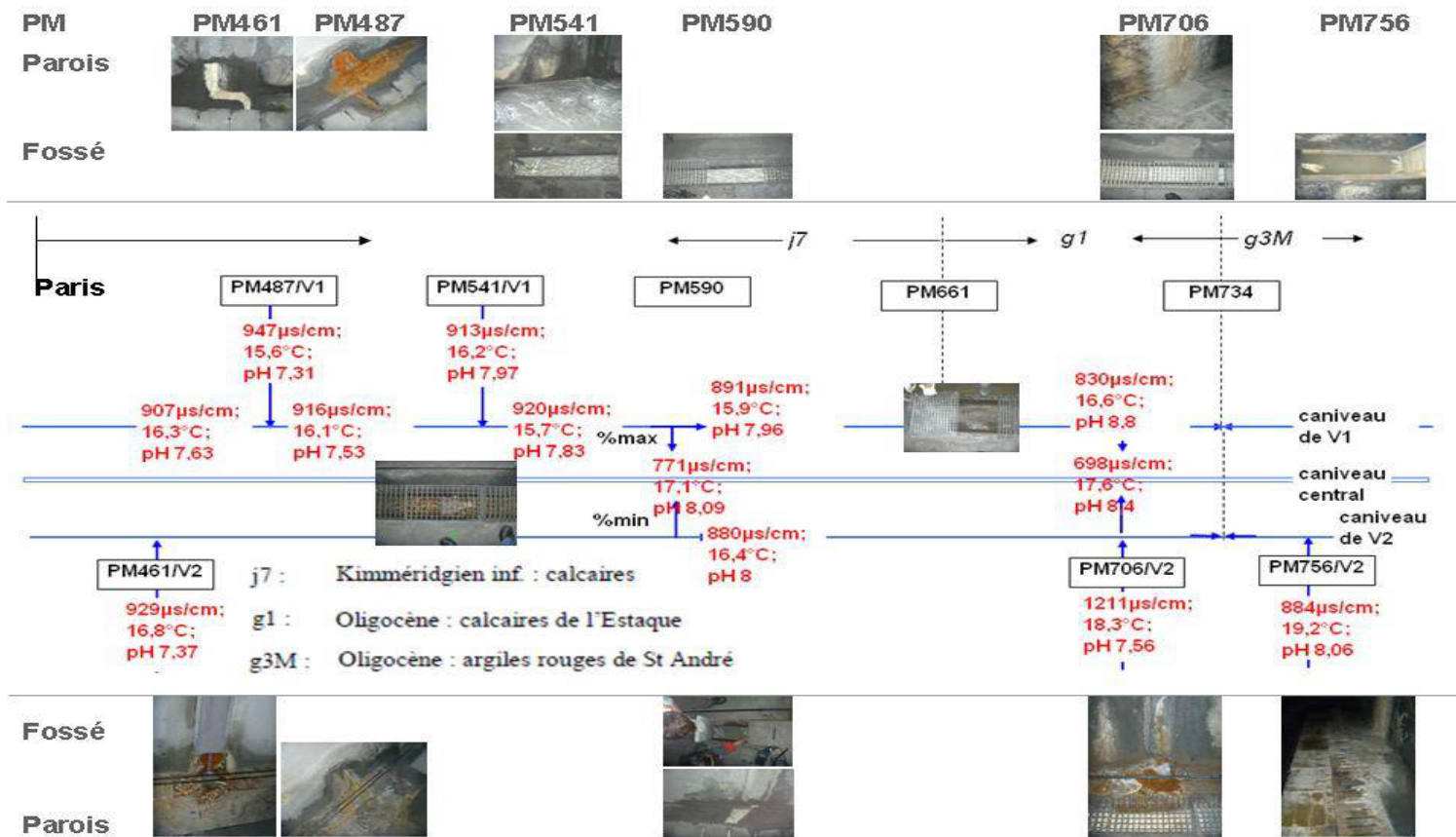
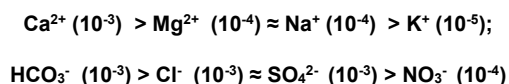


Figure 114: Schéma de principe du système de drainage et lan d'échantillonnages sur le site de Marseille

A des fins de maintenance préventive vis-à-vis des dépôts carbonatés dans les caniveaux de tunnels, I&POA et l'Infrapôle testent depuis une solution de d'inhibiteurs chimiques. Il s'agit de pastilles contenant essentiellement de l'acide polyaspartique qui agit comme un inhibiteur de la réaction de polymérisation des cristaux de calcite dans l'eau. Les filets de pastilles de 6kg chacun sont disposés dans le caniveau côté voie 2 tous les 50 m de l'amont vers l'aval. Le caniveau V1 sert de référence. Les filets sont renouvelés tous les 6 mois.

### 3. Analyse d'eau et dépôt

Ce site a été visité dans la nuit du 01/07/2014, l'échantillonnage liquide et dépôts sont analysés. D'après les analyses d'eau, l'eau dans le fossé a un pH identique de 7,6 ( $\pm 0,2$  pH) de côté V1 et V2, une température de 16 °C ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est de 910 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . L'eau prélevée au niveau du joint de la construction varie selon le tronçon, se change de chimie en fonction des changements de faciès géologique. En résumé, le pH de l'eau varie de 7,3 à 8,1 ( $\pm 0,2$  pH). La température varie de 15,6 à 18,3 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité varie de 884 à 1211 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs pour les deux eaux sont listés ci-dessous dans l'ordre de concentration décroissante. Le détail des analyses est présenté en annexe 6:



Les dépôts ont été échantillonnés au fond du fossé piédroits côté de la voie V1 au point métrage (PM) 542 avec un marteau piqueur car il est très dure à décoller (Figure 115).

Visuellement, le dépôt est blanc, très brillant, bien cristallisé et laminaire. La ligne laminaire est perpendiculaire à la surface du fossé. D'après l'analyse de DRX en poudre, le dépôt se compose d'une seule phase minérale précipitée : la calcite. L'analyse de calcimétrie montre que la calcite occupe de plus de 85% de la masse totale.



a. DRX-poudre

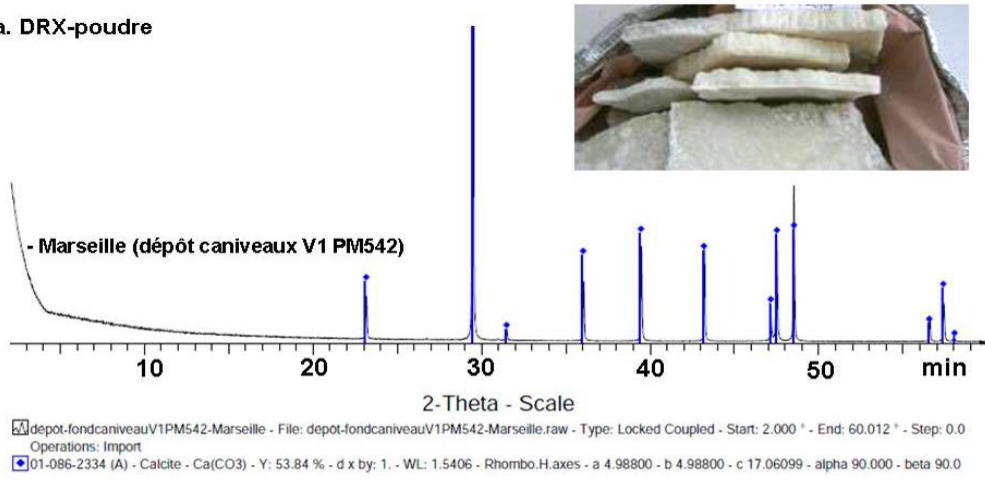


Figure 115: Analyse DRX- dépôts carbonatés de fossé dans tunnel de Marseille



## Tunnel de La Motte

### 1. Localisation

Le tunnel est situé au sud-ouest de Lisieux sur la ligne 366 000 en direction de Cherbourg, entre les PK 196+63 et PK 199+19. La longueur du tunnel est de 2560 m.

### 2. Contexte de site

#### 2.1 Géologie

Les informations sur la géologie locale sont issues des données BRGM (infoterre) et de la carte BRGM (échelle 1/50 000). La géologie varie de l'extrémité ouest vers la sortie dans l'ordre suivant (Figure 116) (cf. Notice BRGM 0121N):

- Albien (C1.) faciès sableux ferrugineux à nodules phosphatés.  
Tertiaire à quaternaire (Rc.) de faciès typique d'argile à silex.
- Weichsélien (B- LPs.) de faciès de limons à silex et argileux.
- Colluvions et alluvions (CFy z.) de faciès de limons sableux.

C1. Cette formation repose en discordance sur les différentes auréoles jurassiques. Cette discordance implique l'existence de déformations entre l'émergence au Jurassique terminal et la transgression au Crétacé moyen, qui dépose d'abord des sables ferrugineux avec nodules phosphatés. Dans l'ensemble, l'Albien supérieur est argileux à caractère transgressif, l'Albien inférieur est sableux se terminant par des faciès régressifs grossiers.

Rc. Cette formation résiduelle est à silex entiers ou fragmentés entourés d'argile silteuse ou sableuse ocre, rouge, grise, verte ou bariolée.

B-LPs. Cette formation résiduelle à silex est cryoturbée ou faiblement remaniée (bief à silex). Il s'agit de limons à silex et localement il y a présence de poches d'argiles ou de sables, souvent argileux.

CFy z. Cette formation est essentiellement composée de limons et de limons sableux, plus ou moins chargés en fragments de silex.



- C1. Albien de faciès sableux ferrugineux avec nodules phosphatés.
- Rc. Tertiaire à quaternaire de faciès typique d'argile à silex.
- B-LPs. Weichsélien de faciès de limons à silex et argileux.
- CFy z. Colluvions et alluvions de faciès de limons sableux.

Figure 116: Carte de la géologie dutunnel de La Motte (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000)

En résumé, d'après la carte géologique, le terrain est principalement argileux à silex. Par contre, la notice BRGM, indique qu'à la sortie ouest du tunnel de la Motte, la présence d'une formation de craie plus ou moins sableuse est présente. Après avoir vérifié précisément les sondages près de deux sorties du tunnel de La Motte, on trouve cette couche de craie à partir de la profondeur de 16 m (151 m NGF) jusqu'à la fin du sondage (60 m) (107 m NGF) au niveau de la sortie ouest de tunnel (Référence sondage BRGM: 01472x0048/F).

## 2.2 Hydrogéologie

Dans la zone étudiée, la nappe principale est la nappe cénomanienne (données ADES du BRGM). Cette nappe est contenue dans la craie fissurée par le niveau imperméable de la glauconie de base et de l'Albien argileux à la base. De nombreuses sources provenant de cet aquifère émergent dans les thalwegs qui entaillent les plateaux du crétacé.

3 piézomètres dont les données sont accessibles dans la zone : piézomètre 1 (ADES 01472x0048/F), piézomètre 2 (ADES 01472x0035/P) et piézomètre 3 (ADES 01216X0135/P). Dans la bibliographie il est possible de trouver les niveaux d'eaux ponctuels dans les piézomètres 1 (131 m NGF) et 2 (120,29 m NGF), et une chronique de suivi entre 01/2015 et 06/2017 dans le piézomètre 3 (146.5 à 147.7 m NGF). Le débit de cette nappe est estimé à 3 m<sup>3</sup>/h (BRGM 01472x0048/F). En couplant les données piézométriques avec la topographie, on trace le profil

altimétrique au niveau du tunnel de La Motte (Figure 117). On observe que la cote de la nappe est supérieure à celle du caniveau de au piedroit du tunnel.

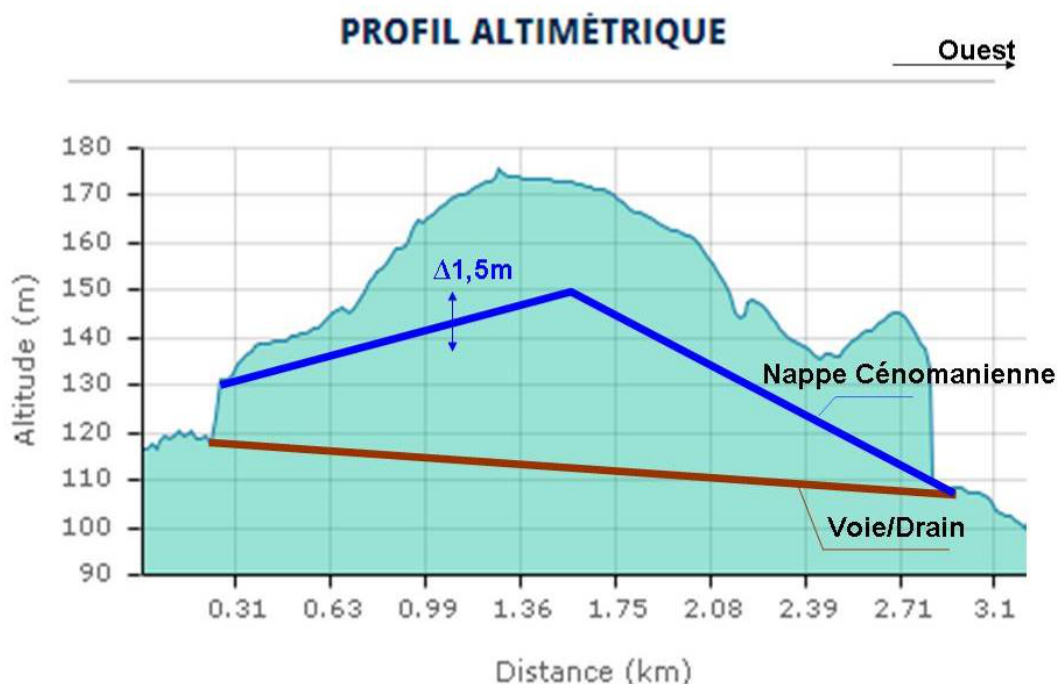


Figure 117: Coupe du sol autour de tunnel de La Motte

Dans la zone, se situe un qualitomètre (ADES 01472X0018/C1) qui donne des informations sur la chimie de l'eau souterraine. L'eau captée est celle de la nappe de la craie, et son débit capté est de  $7m^3/h$ . Comme il n'y pas assez de données de l'eau souterraine permettant de faire une analyse statistique, on choisit d'utiliser la valeur moyenne des mesures pour réaliser la comparaison entre l'eau de l'encaissant et celle drainée par le tunnel de la Motte. Les détails sont synthétisés dans le Tableau 77. On observe que les concentrations de calcium, sodium, sulfate et de l'alcalinité sont plus fortes dans la nappe souterraine que dans l'eau du tunnel. Ainsi que les concentrations de magnésium, chlorure et de nitrate sont plus faibles dans l'eau de la nappe par rapport à l'eau du tunnel.

Dans le sens de diminution, la variation de milliéquivalent de cations (sodium plus 2 fois de calcium) est équivalente que celle d'anion (alcalinité plus 2 fois de sulfate). Ce phénomène peut souligner un processus de mobilisation des particules dans l'eau en diminuant les ions associés, par exemple,  $CaCO_3$ ,  $CaSO_4$ ,  $NaCO_3$ . L'augmentation des ions sont souvent trouvés dans les constituants de certains engrais dans les champs. L'infiltration de la pluie dans la zone peut bien charger l'eau de la nappe avec ces ions, par exemple, magnésium, chlorure et nitrate.

Tableau 77: Comparaison de la chimie de l'eausouterraine avec l'eau drainée dans le tunnel de la Motte

Moyenne	pH	T°C	C25 us/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Cl-	NO3-	SO42-	Alc	Date éch.
tunnel	7.8	12.2	611.8	3.88E-04	4.08E-05	2.84E-03	1.42E-04	4.66E-04	2.02E-04	1.58E-04	5.47E-03	18/06/2015
piézomètre	7.2	NA	NA	5.43E-04	NA	3.20E-03	6.10E-05	3.60E-04	3.35E-05	2.00E-04	6.52E-03	1956 - 1968

NB: la concentration des ions sont en mol/l

## 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

### Parois du tunnel et Système de drainage

Le revêtement de la paroi intérieure du tunnel est réalisé en brique recouvert par endroit de béton projeté en alterance sur l'ensemble du linéaire. De nombreuses arrivées d'eau ont été observées en parois du PM 1400 à 2550 dont une plus importante à un fort débit au PM 1480.

La le tunnel est équipé des caniveaux de piédroit de chaque côté, d'une profondeur d'environ 1 m en béton préfabriqué. Ils sont connectés au caniveau central. Les couvercles des caniveaux sont une alternance de béton ou de grilles métalliques avec fente de 2 à 3 cm de largeur. Tout le long du tunnel, on observe un très bon écoulement des eaux avec plusieurs centimètres de hauteur et un débit varié.

## 2.4 Observation du terrain

### Etat du colmatage

Les caniveaux ont été nettoyé en Mars 2015, ils sont dans l'ensemble relativement propres. Sur les caniveaux à couvercle béton on observe la formation de dépôts carbonatés empêchant l'accessibilité à ces derniers. Pour les couvercles en grille métallique on observe du ballast formant un barrage dans le caniveau où les dépôts se forment localement.. Le peu de dépôts observé au fond des caniveaux est mou et de couleur grise de 1 à 2 cm, 3 mois après le nettoyage. Il n'y a quasi pas ou très peu de calcite dure.

De grandes draperies blanches de 6 m de hauteur et de 30 cm de largeur ont été observées du PM 2100 au PM 1800 et du PM 1700 au PM 800. Le tunnel présente des draperies le long du piédroit et se finit par des formations de type « colonne ». Ces incrustations forment un tapis uniquement dans les parties du tunnel formé de parois de brique. Ces grandes incrustations en parois peuvent engendrer des modifications de la section du tunnel, créant des problèmes pour le gabarit.

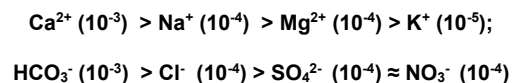
## Test de traitement curatif

Depuis 2015, un test de traitement à l'acide chlorhydrique est mis en place sur les 500 derniers mètres du tunnel (côté Caen). L'acide (10% HCl) est injecté dans un caniveau d'un seul côté pour permettre la comparaison avec le caniveau opposé. A cet effet, une canalisation en PEHD d'un diamètre de 40 mm est installée à l'intérieur du tunnel. Elle est connectée avec un container de 1000 l de solution d'acide qui est posée en haut à la sortie du tunnel. L'injection est réalisée en 4 points, pour un volume envisagé de l'ordre de 30 l/j. L'injection est contrôlée par des électrovannes radio-pilotées via un système de télétransmission.

### 3. Analyse de l'eau et des dépôts

Ce site a fait l'objet d'une visite et d'une campagne de mesures et de prélèvements le 18/06/2015. Les échantillons ont été analysés au laboratoire, l'échantillonnage liquide et dépôts sont analysés. Lors de la préparation de la campagne, d'après le plan d'échantillonnage (Figure 118), 7 prélèvements liquides (S1 à 7) et 3 échantillons de dépôts (E1 à 3) étaient envisagés, mais à cause du fait de la profondeur importante du caniveau le prélèvement de l'échantillon E1 n'a pas pu être effectué. S3 à S6 sont les échantillons d'eau prélevés dans les barbacanes ou fissures de paroi, et les autres ont été réalisées dans les caniveaux. E3 est le dépôt échantillonné en paroi, et les restes deux sont faits au fond du caniveau.

D'après l'analyse d'eau, l'eau dans le fossé a un pH de 8 ( $\pm 0,2$  pH) côté V1 et V2, une température de 12,3 °C ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est de 515 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La qualité de l'eau prélevée au niveau du joint de construction varie selon la zones, le pH de l'eau varie de 7,08 à 7,91 ( $\pm 0,2$  pH). La température varie de 11,9 à 13,4 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité varie de 642 à 763 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs pour les deux eaux sont listés dans l'ordre décroissant de concentration, le détail des analyses est consultable à l'annexe 6:



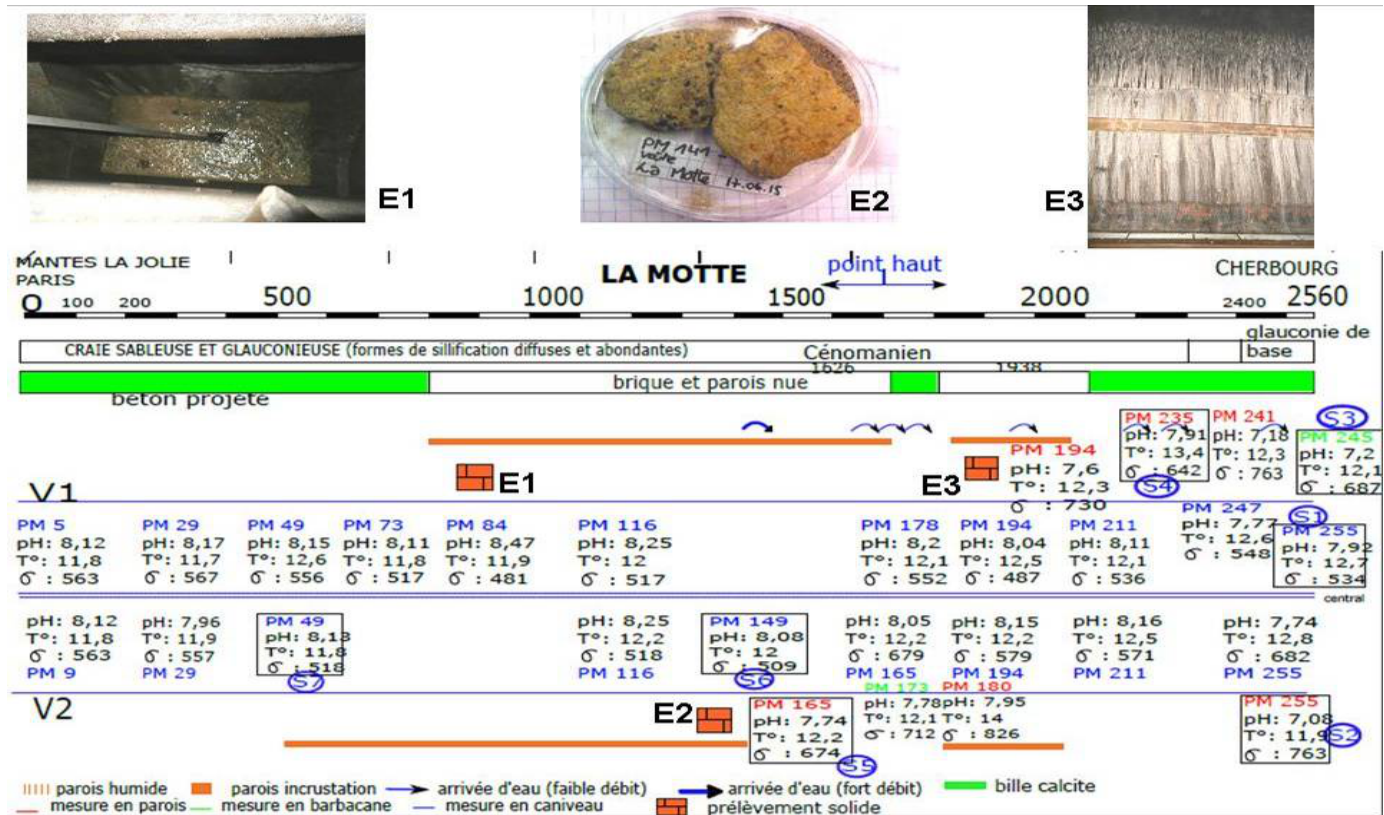


Figure 118: Plan d'échantillonnages dans le tunnel Le Motte



D'après la mesure du pH – T°C - C25 tout le long du tunnel, on observe que la conductivité de l'eau qui percole sur la paroi est plus forte que celle de l'eau dans les caniveaux au même PM. Le pH de l'eau de paroi est plus faible que celui de l'eau du caniveau. La température de l'ensemble des mesures est de  $12\pm 1^\circ\text{C}$ .

Les résultats de l'analyse des dépôts échantillonnés en paroi aux PM 141 (E2) et PM 194 (E3) sont illustrés dans la figure suivante (Figure 119). On voit que le dépôt au PM141 se compose de gypse (54%), de quartz (32%), de muscovite (11%) et de goethite (3%). D'après la géologie in situ, ce dépôt peut-être un apport par soutirage des matériaux du sol encaissant. Le dépôt du PM 194 est essentiellement composé de calcite et de moins de 1% de quartz.

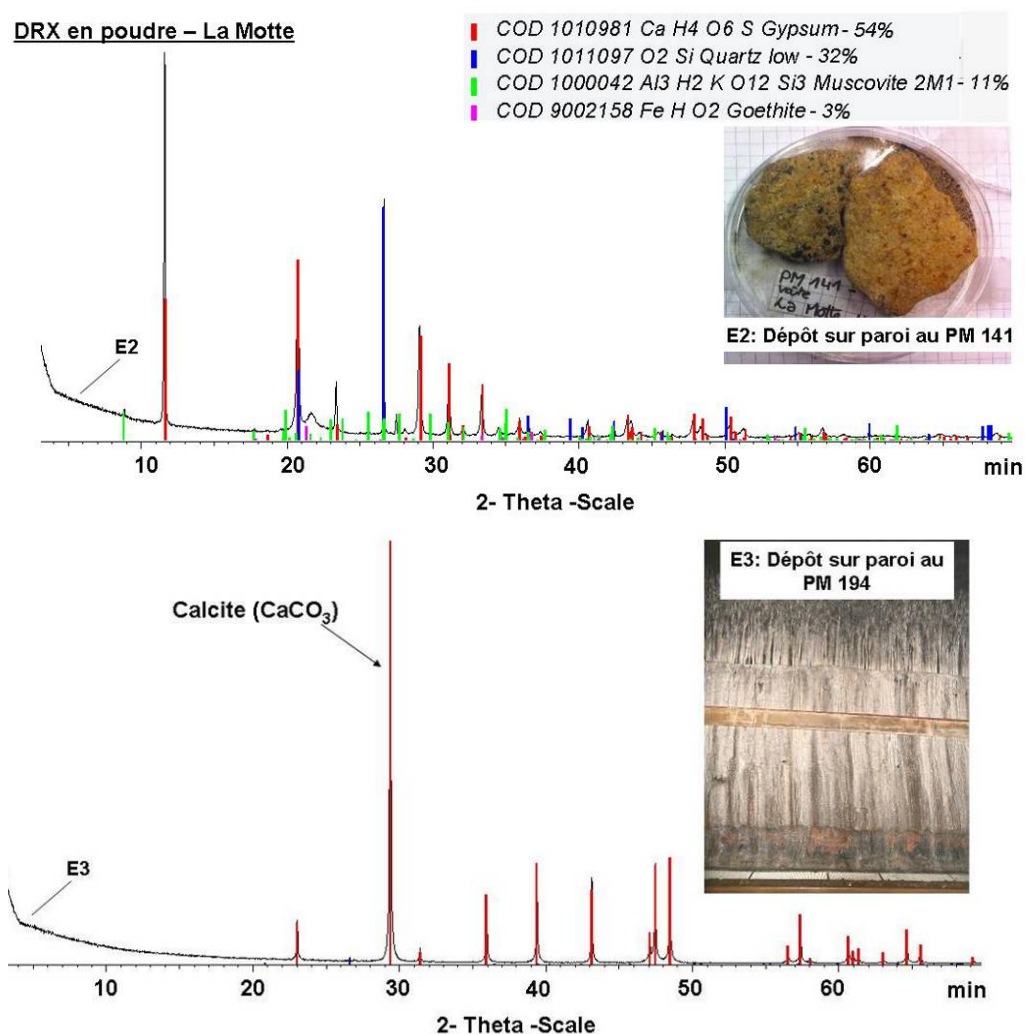


Figure 119: Analyse DRX- dépôts du fossé dans le tunnel La Motte

## Tunnel de Nantilly

### 1. Localisation

Le tunnel est situé à proximité de la gare de Saumur (milieu urbain) sur la ligne 500 000 reliant Chartres à Bordeaux-Saint-Jean, du PK 289+09 au PK 290+141. Sa longueur est de 105 m. C'est un tunnel à voie unique.

### 2. Contexte de site

#### 2. 1 Géologie

La géologie locale change successivement de l'extrémité vers le centre de tunnel de Nantilly dans l'ordre suivant (Figure 120) (cf. notice BRGM 0485N):

Partie moyenne du Turonien (C3b), de faciès craie sableuse et micacée. Cette formation correspond au Tuffeau de Bourré de Touraine. C'est une craie blanche, tendre, finement glauconieuse, micacée ; elle est souvent sableuse et friable et renferme des silex gris à noyau sombre et des cherts branchus qui peuvent être groupés en lits ou épars dans la masse calcaire

Sénonien (C4.), sénonien de faciès sableux. Le Sénonien supérieur manque. Le Sénonien inférieur est représenté par des formations grés-sableuses. A sa base, le Sénonien est constitué par des niveaux de graviers et de sables grossiers en surmontant une mince couche d'argile rougeâtre

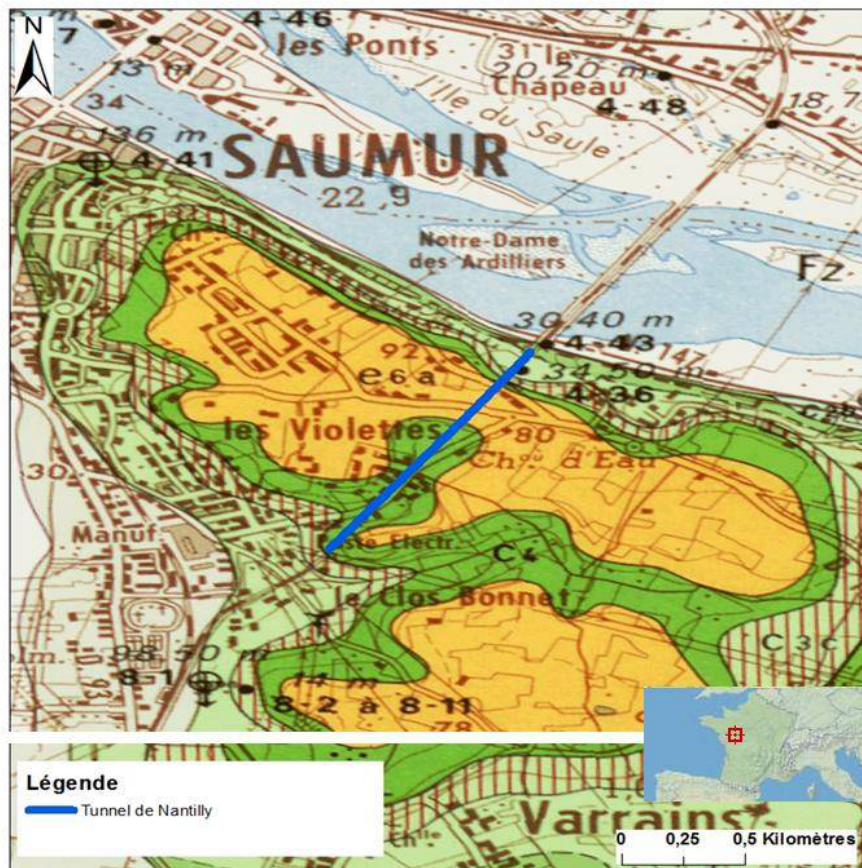
Bartonien inférieur (e6a.), de faciès de grès Sabalites. Les Grès à *Sabalites* qui proviennent du remaniement sur place ou à faible distance, du Sénonien sous-jacent. Le grès peut être friable ou très dur, à grain fin ou grossier et les oxydes de fer le colorent fréquemment en rouge.

#### 2.2 Hydrogéologie

Dans la zone, il y a deux types de nappe de la moins à la plus profonde : la nappe des alluvions et la nappe Cénomaniennne. Les alluvions supérieures sont composées de sols fins et argileux qui constituent un mauvais aquifère, les débits obtenus restent faibles. Les sables et les graviers de la base des alluvions constituent l'aquifère des alluvions inférieures où les débits obtenus peuvent atteindre 80 m<sup>3</sup>/heure.

Au contact du Cénomaniennne et du socle, on rencontre fréquemment des sources avec des débits variables. Les graviers de base du Cénomaniennne recèlent des ressources en eau importantes. Des débits de l'ordre de 80 m<sup>3</sup>/heure sont courants, mais l'eau est généralement ferrugineuse.





- C3b. Partie moyenne du Turonien de faciès craie sableuse et micacée.
- C4. Sénonien de faciès sableux.
- e6a. Bartonien inférieur de faciès de grès Sabalites.

Figure 120: Carte de la géologie autour du tunnel de Nantilly (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000)

En rassemblant les niveaux d'eau dans les sondages/piézomètres près de tunnel de Nantilly : 5 piézomètres à la sortie nord du tunnel (ADES- 04854X0187/U5 ; 04854X0237/F1AVAL ; 04854X0247/AEP ; 04854X0232/F2 et 04854X0186/P2) et 3 sondages à la sortie sud (InfoTerre BRGM- 04858X0063/SD1/C ; 04858X0134/F et 04858X0121/F), on trace le profil altimétrique de la Figure 121.

On observe la présence de la nappe Cénomaniennne dans l'encaissant du tunnel, à proximité de la plateforme. Côté sud, il peut y avoir des variations d'environ 15 m en fonction des périodes, et dans ce cas la plateforme et l'extrados ne sont pas toujours en eau. En se rapprochant de la sortie nord du tunnel, le niveau statique moyen de la nappe est proche de la plateforme et a donc plus d'impact sur le drain.

Dans la zone étudiée, on a trouvé deux qualitomètres (ADES, 04854X0187/U5 et 04854X0237/F1) dans lesquels l'ensemble de 12 analyses ont été effectuées entre 1986 et 2014. Étant sous limite de faible nombre de mesure dans le tunnel de Nantilly (4 mesures), le choix d'utiliser la valeur moyenne de la mesure afin de comparer l'eau souterraine et l'eau (nappe de Cénomanienne) dans le drain de tunnel semble plus pertinent qu'une boîte de moustache. Les détails des comparaisons sont synthétisés dans le Tableau 78.

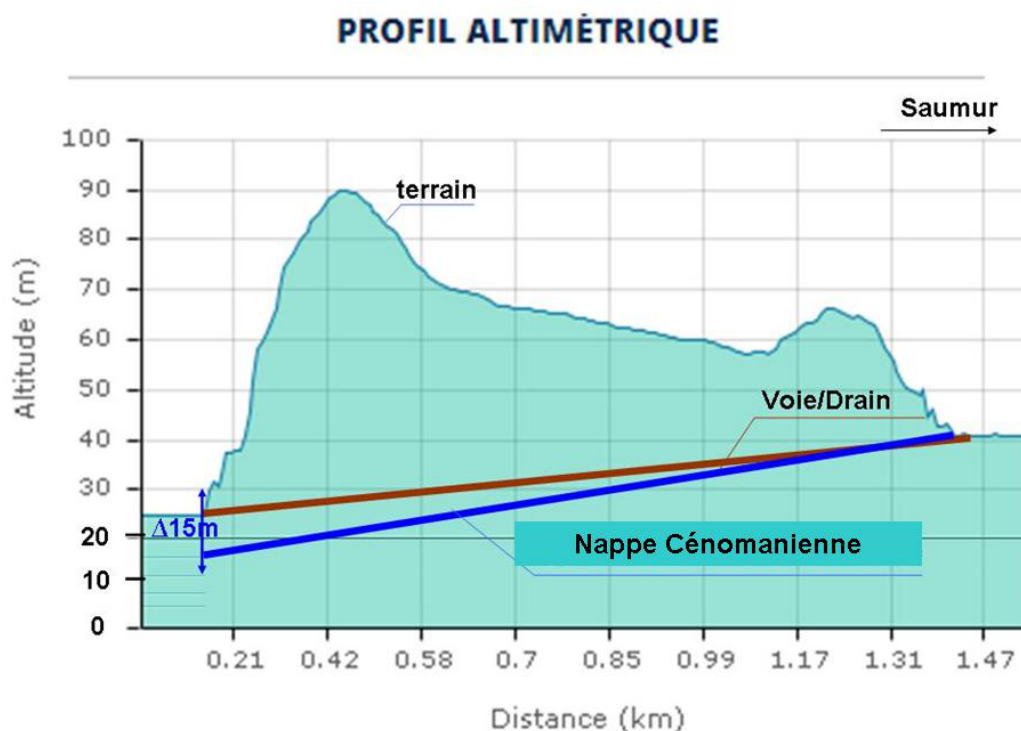


Figure 121: Coupe du sol autour de tunnel de Nantilly

On observe que pour l'ensemble des ions majeurs, la concentration moyenne dans l'eau est plus élevée dans le drain du tunnel que dans le piézomètre. L'eau est chargée de plus des ions dans les milieux ferroviaires avant l'entrée dans le drain de tunnel.

Tableau 78: Comparaison de la chimie d'eau souterraine locale avec l'eau dans le tunnel de Nantilly

Moyenne	pH	T°C	C25 µs/cm	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Cl-	NO3-	SO42-	Alc	Date éch.
tunnel	8.0	15.1	694.3	7.00E-04	1.08E-04	2.83E-03	2.15E-04	5.99E-04	8.30E-04	7.01E-04	3.99E-03	30/06/2015
piezometre	7.4	13.9	325.7	5.61E-04	7.26E-05	1.12E-03	2.03E-04	4.72E-04	8.47E-05	1.85E-04	2.28E-03	1968;2004 - 2014

NB: la concentration des ions sont en mol/l

### 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

Les caniveaux latéraux de piédroit dans la théorie sont des fossés bétons préfabriqués à barbacane (FBPB), mais visuellement lors de la visite nous avons constaté qu'il s'agissait de fossés pierres. Les fossés descendent à 50 cm de profondeur environ. Le fossé évacue la nappe de la craie. Tout le long du tunnel, on observe un très bon écoulement des eaux avec plusieurs centimètres de hauteur, mais le débit varie le long de la voie.

### 2.4 Observation du terrain

Du fait de la visite de terrain, on observe que :

- Dans son ensemble, ce tunnel est très poussiéreux. De nombreuses remontées boueuses ont été observées aux PM 1, PM 10, PM 24, PM 30 ;
- C'est à l'exutoire (côté Saumur) que les dépôts carbonatés sont les plus importants (hypothèse d'environ 50cm). La hauteur de l'eau est d'environ 5 cm.

### 2.5 Etat du colmatage

A cause du colmatage des fossés (caniveaux) de piédroits, dans certaines zones, la plateforme présente quelques remontées boueuses, par ex : aux PM 1 , PM 10, PM 24 et PM 30. C'est à l'exutoire (côté Saumur) que les dépôts carbonatés sont les plus importants (hypothèse d'environ 50cm). La hauteur de l'eau est d'environ 5 cm côté gauche et 3 cm côté droit. On observe la présence d'algues et de mousse verte jusqu'au PM 1 (Figure 123c).

Le long du tunnel on observe une épaisseur de dépôts carbonatés 2 fois plus importante du côté gauche. Ils sont de couleur grise et leur dureté varie, il semblerait que ces dépôts forment une croûte très dure à casser au marteau en surface, puis une partie plus sableuse en dessous.

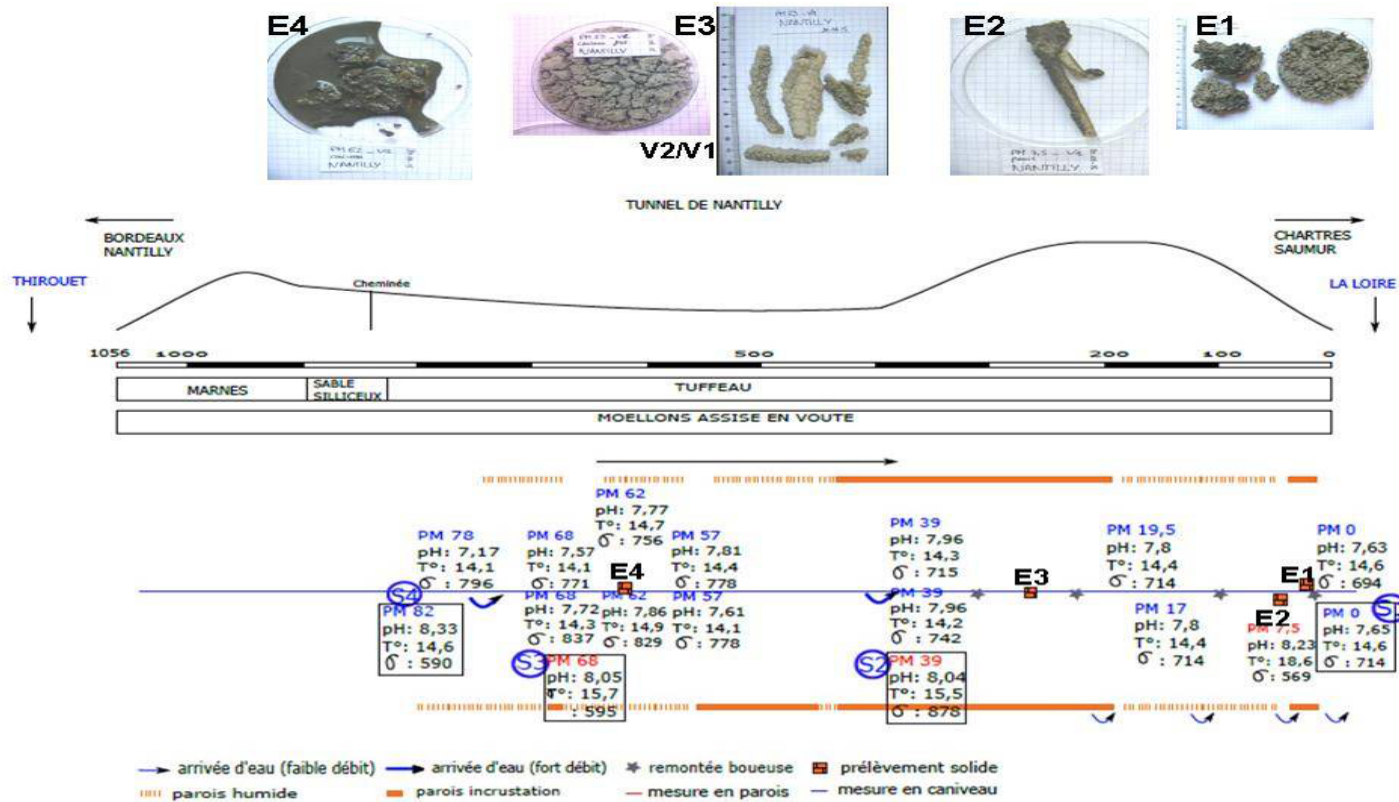


Figure 122: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Nantilly



Le côté droit présente également des dépôts carbonatés de couleur grise mais de nature plus molle, et moins abondante à que gauche (Figure 123b).

Le revêtement du tunnel est principalement fait de moellon calcaire sauf au deux extrémités qui sont couvertes de béton. Les premières concrétions en parois apparaissent au PM 5 (Figure 123 a). Ces draperies blanches mesurent environ 5 cm de largeur et 1m90 de hauteur. A partir du PM 23, elles sont présentes de manière plus régulière de chaque côté des parois jusqu'au PM 44. Le côté gauche est également plus colmaté au niveau des parois puisque ces draperies sont présentes jusqu'au PM 71.

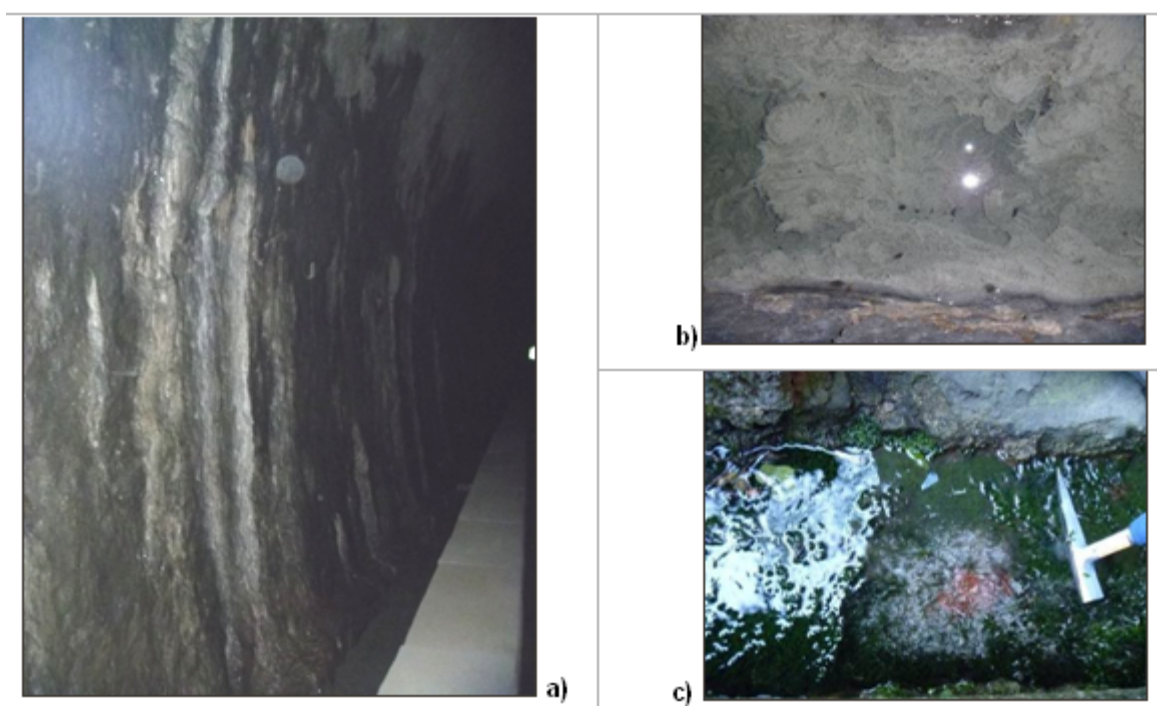


Figure 123: Photos - dépôts en parois et en caniveaux - tunnel Nantilly

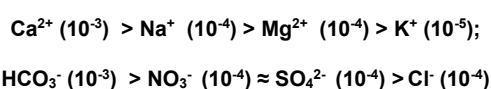
NB : a) Paroi droite ; b) caniveau droit ; c) caniveau gauche

### 3. Analyse d'eau et dépôt

L'eau de la nappe de la craie Séno- turonienne est de type carbonaté calcique (dureté 20° à 33°), avec un pH basique de 7,5 à 8,6 (Martin and Lalleron, 2009). Sur la zone d'affleurement, la nappe est généralement impactée par les activités de surface, notamment d'origine agricole. Les teneurs en nitrates n'ont cessé de croître jusqu'à des valeurs dépassant souvent 50 mg/l (cf. <http://sigescen.brgm.fr/Fiche-d-identite-nappe-de-la-craie.html>).

L'échantillonnage (Figure 122).a été réalisé lors de la visite du 30/06/2015. Les prélèvements d'eau ont été réalisés au niveau du joint de construction de la paroi et au fond du caniveau, nommé de S1 à S4, et les échantillons de dépôts d'E1 à E4 ont été prélevés dans les caniveaux (E1, 3, 4) et en paroi (E2),

L'eau dans le fossé a un pH de 7,6 ( $\pm 0,2$  pH), une température de 14,6 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau au moment des mesures est entre 590 à 714 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les variations de conductivité (595 à 878 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et de pH montrent que la qualité de l'eau de paroi prélevée au niveau des joints varie en fonction des tronçons construction varie selon les tronçons au niveau de la conductivité : de Le pH et la température restent constants : respectivement 8,0 ( $\pm 0,2$  pH), et 15,5 ( $\pm 0,5$  °C) . Les ions majeurs pour les deux eaux sont listés ici dans l'ordre de concentration décroissante, le détail d'analysé voit dans l'annexe 6:



Les résultats des mesures ponctuelles du pH, de la T°C et de la C25 le long des caniveaux des deux côtés sont illustrés dans la Figure 122. On voit que le pH et la température de l'eau drainée par la paroi sont plus élevés que ceux de l'eau des caniveaux. La conductivité est très variable le long du tunnel. Par ailleurs la comparaison de la chimie de l'eau au même PM, dans les caniveaux de chaque côté montre peu de différence (écart de mesure < 5%).

4 dépôts échantillonnés dans le caniveau de piédroit à différents endroits sont analysés par diffraction aux Rayon-X, les résultats sont illustrés dans la Figure 124.

A l'exception dudernier dépôt au PM 62 (E4), les dépôts de fond de caniveau (E1 et E3 V1/V2) sont essentiellement composés de calcite (> 92%) avec légèrement du quartz (>5%). Il y a quelques traces de sphalérite ( $\text{Zn}_{0.73}\text{Fe}_{0.27}\text{S}$ ) dans le dépôt duPM 23 côté voie 1 et une trace de chlorite ( $\text{Si}_2\text{Mg}_3\text{O}_9\text{H}_4$ ) dans le dépôt au PM 23 côté voie 2. Le dépôt au PM 62 se compose de quartz (36%), feldspath (33,5%), calcite (20%), ferropargasite (8%) et de chlorite (2,5%). D'après sa compositions, ce dépôt au PM 62 est plutôt un dépôt de transport de fines de l'encaissant à la géologie sableuse (silice) (Figure 122).

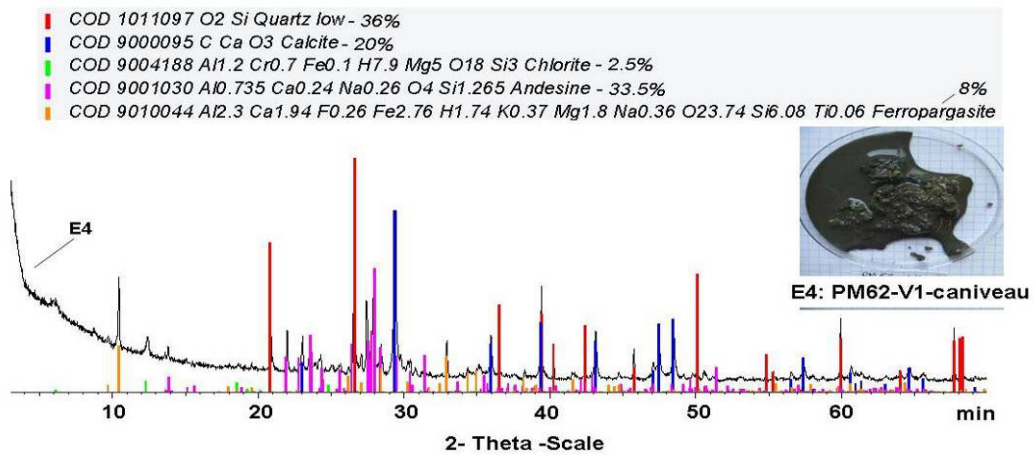
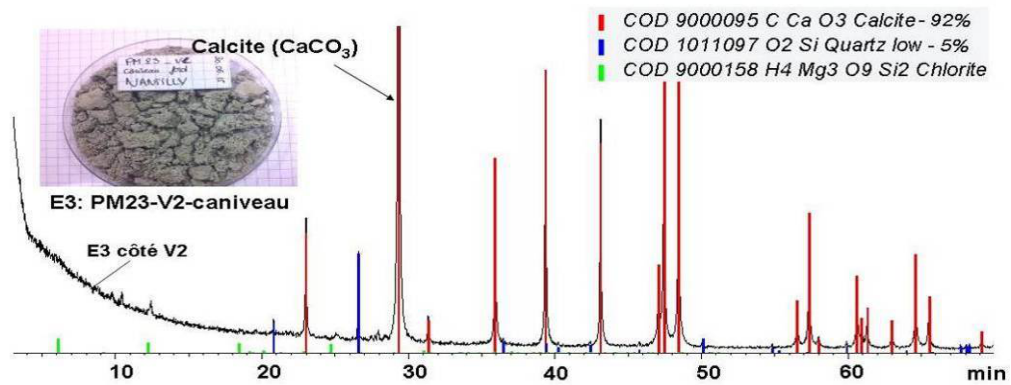
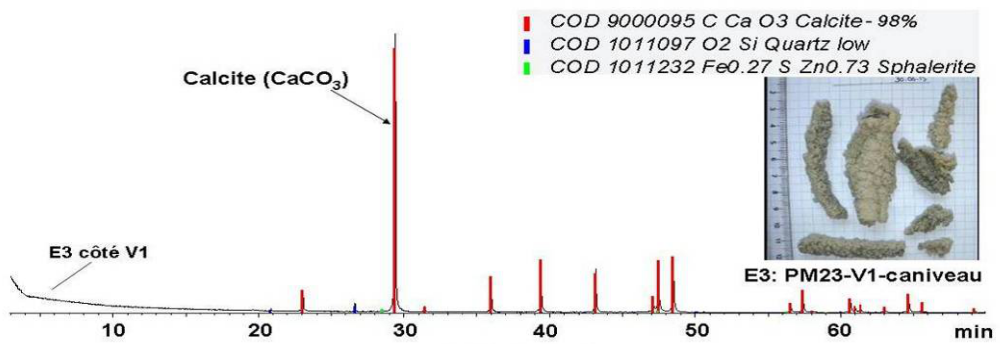
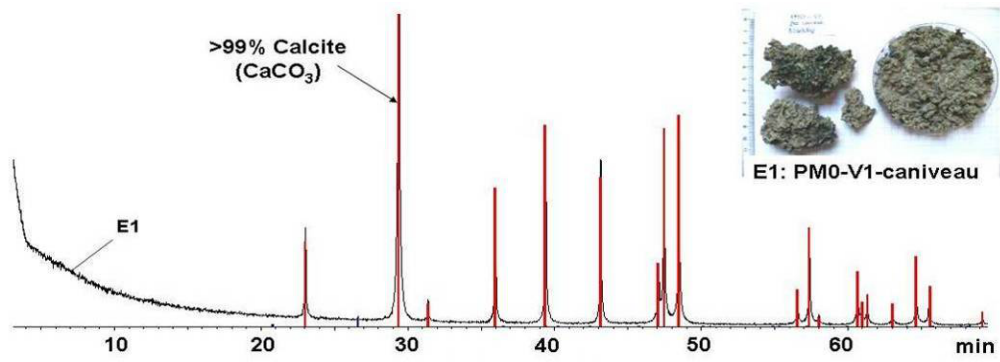


Figure 124: Analyse DRX- dépôts de caniveau de piedroit dans le tunnel de Nantilly

2 échantillons de sol Deux échantillons ont été prélevés sur des carottes stockée à l'Infrapôle de Saumur. Ces carottes proviennent d'une campagne de sondages géotechnique d'il y a une vingtaine d'années. A titre comparatif, ces échantillons ont été analysés. Les carottes choisies pour cette expérimentation correspondent aux PM et au PM. Les échantillons ont été analysés par diffraction aux Rayon-X. Les résultats sont illustrés dans la Figure 125.

L'échantillon du PM 7.19 correspond au sol dede profondeur 0 à 1m. Il se compose de quartz (43%), Anorthite (23%), Orthoclase (13%), Calcite (9,5%), Muscovite (7%), Kaolinite (3%) et Gypse (0,5%). Au PM 36.7 l'échantillon correspond à la profondeur 1 à 1,9 m. Il se compose de calcite (73%), de quartz/tridymite et cristobalite, polymorphes de la silice (18%), de muscovite (6%), et d'anorthite (3%). Ce résultat confirme les informations de la géologie locale : sable siliceux au PM 7.19 et tuffeau de la craie micacée ou sableuse au PM 36.7 indiqués dans la Figure 122.

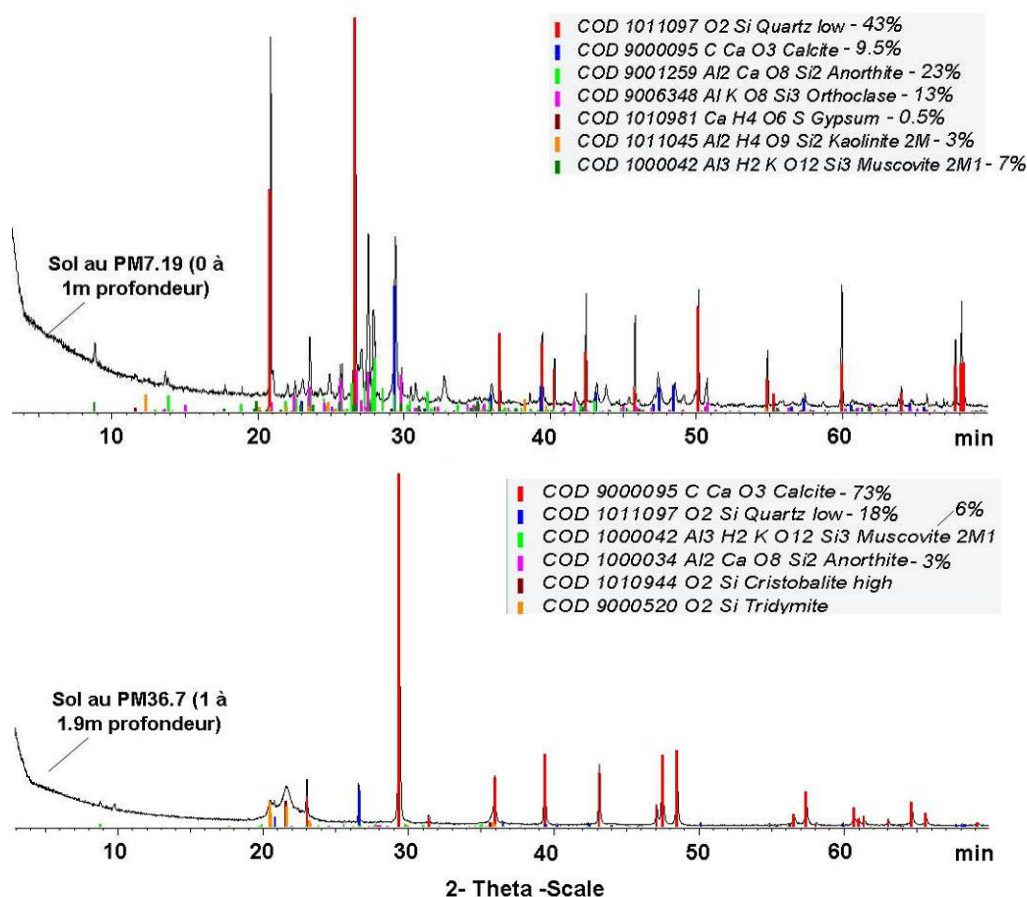


Figure 125: Analyse DRX d'échantillons de sol issus d'une ancienne campagne géotechnique - tunnel de Nantilly



## Tunnel Caluire

### 1. Localisation

Le tunnel se situe entre le Rhône et la Saône au Nord Est de Lyon sur la ligne de Collonges - Fontaines à Lyon - Guillotière entre le PK 501+432 et le PK 503+835. La longueur du tunnel est de 2405 m.

### 2. Contexte de site

#### 2.1 Géologie

La géologie au niveau du tunnel de Caluire change successivement des deux extrémités de tunnel vers le centre du tunnel dans l'ordre suivant (Figure 126) (cf. notice BRGM 0698N):

Fy-z. – C'est une formation d'Alluvions fluviales modernes.

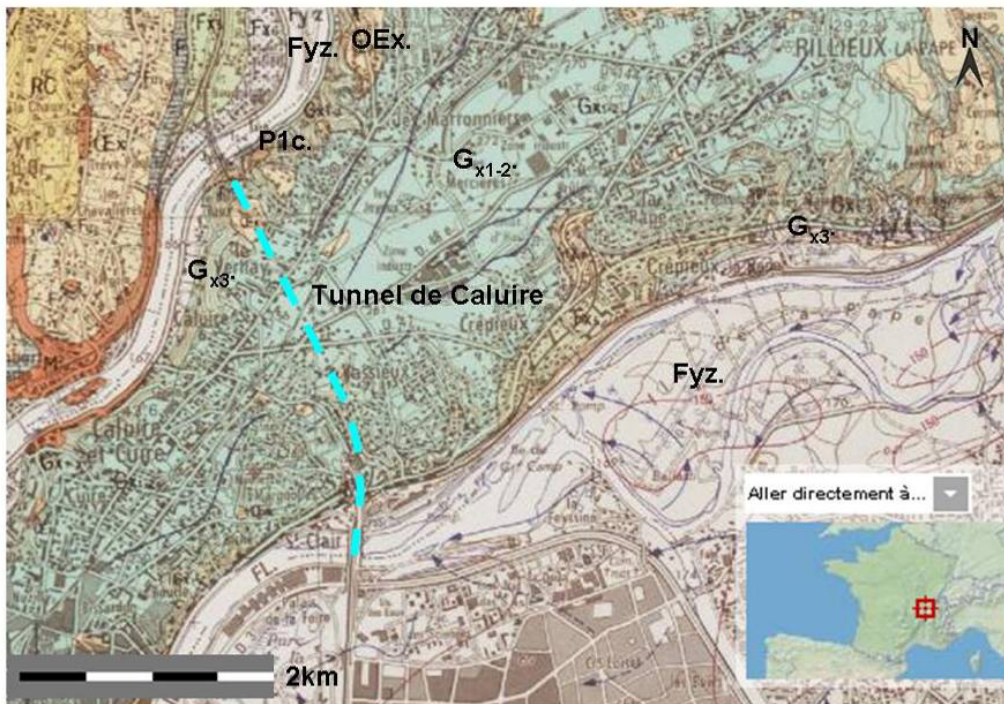
G<sub>x3</sub>. – Cette formation est une accumulation d'une relativement grande épaisseur d'alluvions (Neyron).

P1 c. Cette formation se compose de marnes, argiles, sables et couches de lignites. En dehors de quelques affleurements dans les vallons de la partie nord du val de Saône, le Pliocène a été rencontré à la sortie nord-ouest du tunnel de chemin de fer de Caluire.

OEx. – Cette formation se compose de loess et limons wurmiens. C'est un dépôt éolien, fin, friable, siliceux, calcaire et argileux, parfois ferrugineux.

G<sub>x1-2</sub>. – Cette formation correspond à des alluvions fluvio-glaciaires.

En résumé, le tunnel traverse essentiellement des alluvions, et rencontre p des marnes argileuses.



- Fy-z. - Quaternaire, faciès d'Alluvions fluviales modernes.
- Gx3. – Wurmien, faciès d'avillion.
- P1c. - Pliocène, faciès Marnes et sables.
- OEx. – Wurmien, faciès de loess et limons.
- Gx1-2. Wurmien, faciès d'Alluvions fluvio-glaciaires.

Figure 126: Carte e la géologie autour du tunnel de Caluire (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000)

## 2.2 Hydrogéologie

D'après la géologie et l'étude des sondages proches, on souligne la présence de 2 nappes dans la zone du tunnel de Caluire: la nappe des alluvions et la nappe du Pliocène qui est en général plus profonde que celle des alluvions. D'après ces forages (BRGM 06987E0064/P1 ; 06987X503/PR5 ; 06987E0032/S1 ; 06986X0118/S et 06982X0016/S), le niveau de la nappe des alluvions est de 163 mNGF en moyenne le long du tunnel (cf. coupe altimétrique, Figure 127), et le niveau de la nappe du Pliocène est inférieur à 155 mNGF. D'après la coupe, on voit que dans les premiers 300 m, le niveau moyen de la nappe des alluvions est proche de la plateforme, il est donc fort possible que la nappe soit drainée par les caniveaux lors des hautes eaux côté nord.

Nous n'avons pas trouvé d'informations bibliographiques sur la chimie de l'eau de la nappe des alluvions dans la zone étudiée. Cependant étant donné la géologie des formations pliocènes proches on suppose que l'eau de la nappe d'alluvions est déjà riche en calcaire avant d'être entrée dans le drain du tunnel.

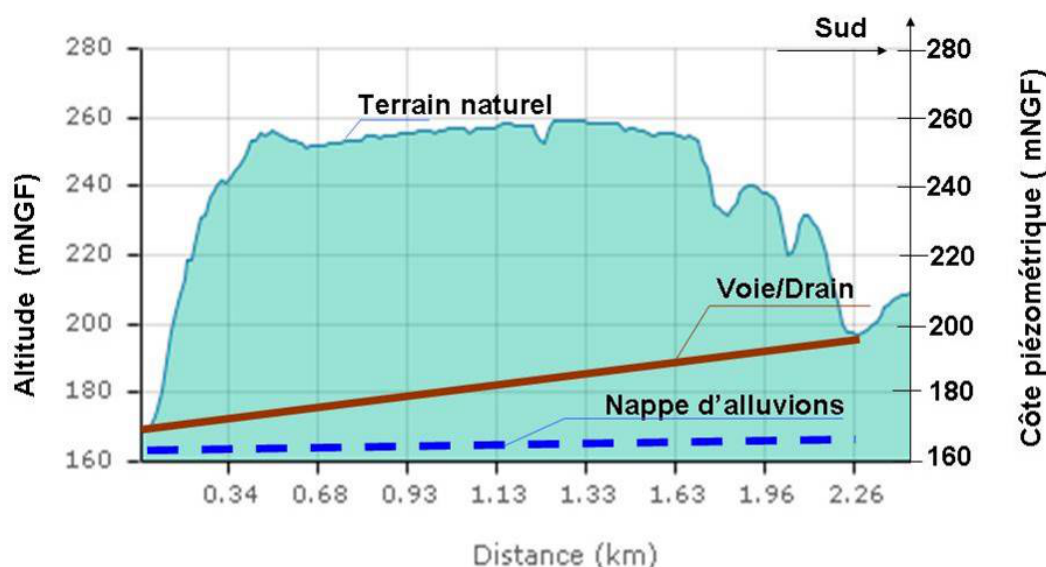


Figure 127: Coupe du sol autour de tunnel de Caluire

## 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

### Parois et système de drainage

Le revêtement des parois du tunnel est fait de moellons calcaires et de mortier de chaux. De nombreuses arrivées d'eau sont présentes le long du tunnel de Caluire (V1-V2). Elles sont discontinues et relativement plus importantes aux extrémités du tunnel. Les arrivées d'eau se situent aux PM6 – PM12 – PM78 – PM102 – PM124 – PM203 – PM 2012.

Les caniveaux de piédroits sont en béton préfabriqué avec couvercle en béton. Le point haut du caniveau est au PM 1200. La pente vers côté Collonges est 3,5 mm/m ; et celle vers côté Lyon est 2,5 mm/m. Les deux caniveaux de piédroits sont connectés à un caniveau central non accessible.

## 2.4 Observation du terrain

### Etat du colmatage

De nombreuses concrétions sont présentes sur la paroi le long du tunnel de Caluire (V1-V2). Elles sont discontinues et relativement plus importantes aux extrémités du tunnel. Elles se forment principalement le long des barbacanes et mesurent environ 2 m de hauteur descendant jusqu'aux couvercles de caniveaux. La présence de dépôts en forme de billes sphériques assimilées à des pisolithes entre les PM 500 et 1000 a attiré notre attention. Ces dépôts se situent en aval du passage du calcaire oolithique situé entre les PM200 et 400.

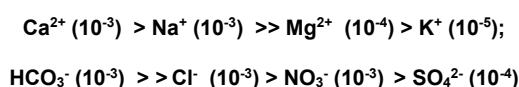
Les couvercles de caniveaux sont pour la plupart scellés par des dépôts blancs et dur empêchant leur ouverture, ce qui n'a pas permis de conduire l'observation dans l'ensemble du système de drainage. De manière générale, l'intérieur des caniveaux n'a pu être observé du fait de ces dépôts.

### 3. Analyse d'eau et dépôt

La visite de terrain a eu lieu 26/05/2015. L'échantillonnage (Figure 129) de l'eau (S2 à S8) a été réalisé en paroi (égouttures et arrivées d'eau), au niveau des joints, l'exception de S1 qui a été prélevé au fond du caniveau central. Les échantillons de dépôts (E1 à E3) sont prélevés en parois et dans le fossé.

L'eau dans le fossé a un pH de 8,3 ( $\pm 0,2$  pH), une température de 12,7 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est de 836 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . La conductivité de l'eau échantillonnée au niveau du joint de construction varie selon les tronçons au niveau de la : de 762 à 1165 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Le pH et la température restent quasi-constants : respectivement 8,0 ( $\pm 0,2$  pH), et 12,7 ( $\pm 0,5$  °C).

Les ions majeurs contenus dans les eaux de paroi et de caniveaux sont listés ici dans l'ordre de concentration, le détail des analyses est consultable en annexe 6:



Les valeurs de pH, T°C et de C25 mesurés ponctuellement dans les deux caniveaux sont illustrées dans la Figure 129. On voit que le pH de l'eau perforée dans la paroi avant PM 95 a une tendance de V2 plus élevé que V1. Dans le même PM, La conductivité de l'eau de parois est beaucoup plus forte que celle dans les caniveaux (écart > 20%). La température est assez constante de  $12 \pm 1$  °C.

Les résultats d'analyse de la Diffraction par RX sur les dépôts (Figure 129) de parois (E1/E3), et de piédroit(E2) sont illustrés dans la Figure 128. Quelle que soit le lieu de dépôt ou la forme du dépôt, l'unique phase minérale détectée par RX est la calcite.

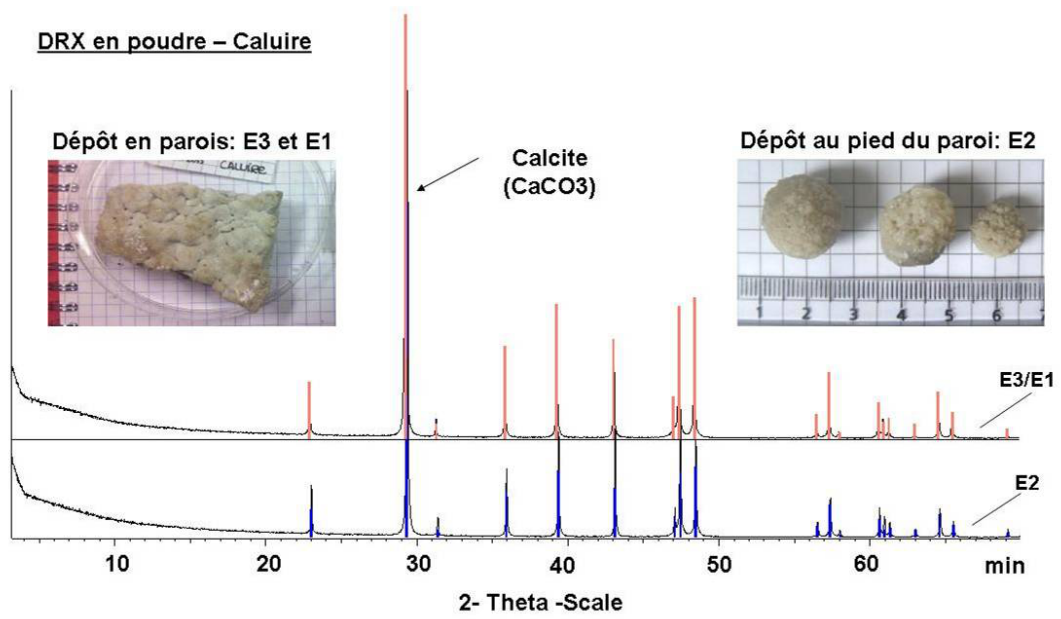


Figure 128: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de Caluire

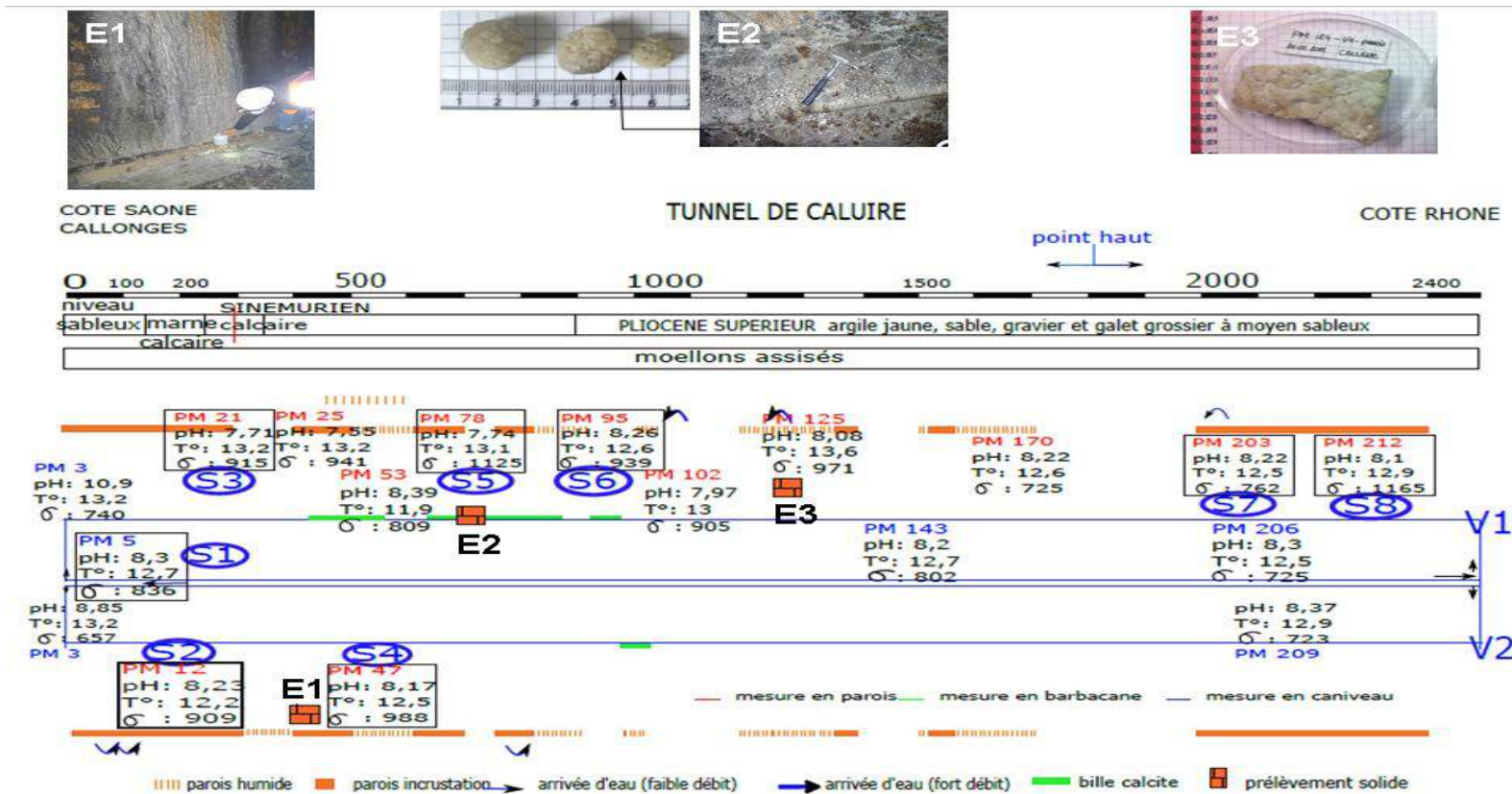


Figure 129: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Caluire



## Tunnel La Ramade

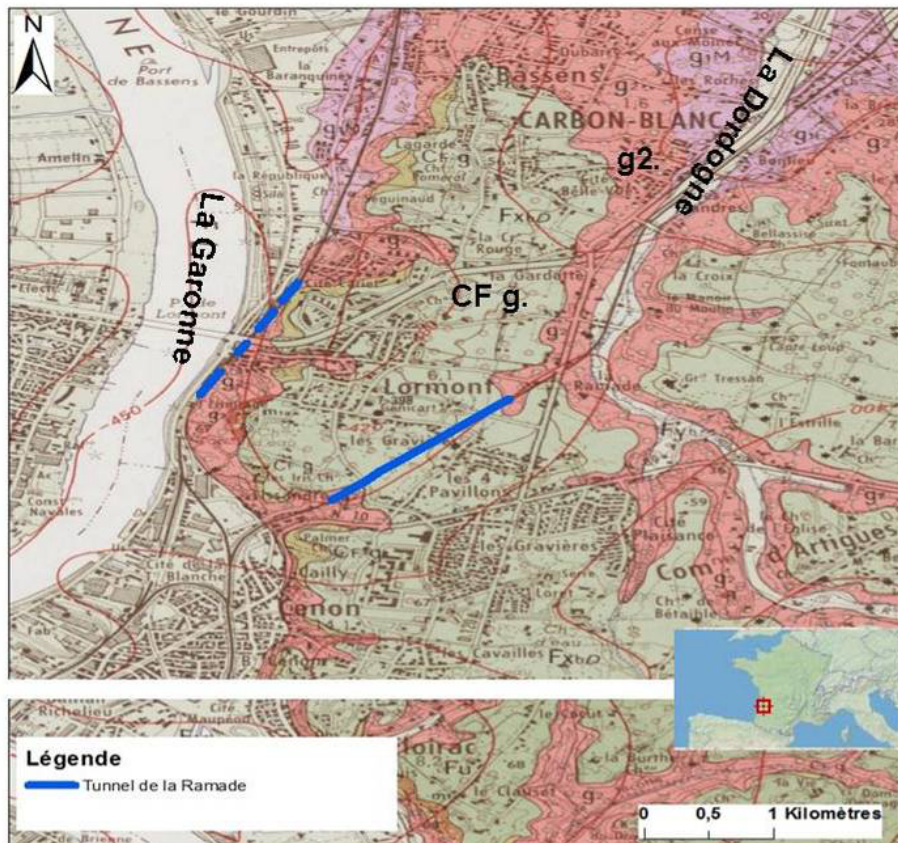
### 1. Localisation

Le tunnel se situe au nord de Bordeaux Cenon sur la ligne 50 000, du PK 605+89 au PK 607+232. La longueur du tunnel est de 1343 m.

### 2. Contexte de site

#### 2.1 Géologie

La géologie dans la zone change des deux extrémités du tunnel de La Ramade au centre du tunnel dans l'ordre suivant (Figure 130) (cf. notice BRGM 0803N):



g2. Oligocène moyen (stampiens) de faciès calcaires  
CF g. Quaternaire ancien de faciès d'alluvions et calcaire altéré

Figure 130: Carte de la géologie autour du tunnel de La Ramade (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000)

g2. - Cette formation est essentiellement carbonatée. A la base, on observe un calcaire fin de patine et de teinte grise à gris-bleu. A l'affleurement, ce calcaire fin est sableux ou argileux. Les sous couches, elles sont constituées de calcaire grossier, jaune.

CF-g. – Cette formation de versant est constituée à la fois par du matériel issu des formations fluviales : sables argileux, graviers, petits galets et alluvions anciennes de faible perméabilité, et par les formations calcaires tertiaires. Ces dépôts résultent en majeure partie de l'altération de falaises calcaires par des actions physico-chimiques et par l'entraînement des formations fluviales ar ruissellement.

En résumé, le tunnel est situé dans des couches d'argile, tuffeau calcaire et sable en alternance.

## 2.2 Hydrogéologie

D'après la notice géologique (notice BRGM 0803N) les nappes présentes dans la zone d'études sont la nappe des alluvions, la nappe de l'oligocène (Calcaire Stampien), la nappe de l'Eocène (aquifère complexe), et la nappe du Cénomano-Turonien dans le sens de la surface vers le plus profond. En général, la nappe des alluvions et la nappe de l'oligocène sont en communication hydraulique directe ou indirecte dans les 50 premiers mètres. Les nappes de l'Eocène et du Cénomano-Turonien sont des nappes profondes (centaine à mille mètres profond) qui ont peu de risque de contact avec le tunnel de la Ramade.

La nappe des alluvions anciennes a une perméabilité relativement faible. La nappe des calcaires oligocènes est alimentée par infiltration des eaux météoriques et contribue à la recharge des nappes sous-jacentes. Elles sont drainées par les ruisseaux affluents de la Garonne et de la Dordogne. Ici, en récupérant les niveaux d'eau retrouvés dans les forages/piézomètres près de la sortie nord (cf. ADES 08037x0429/F2), sud (cf. BRGM 08037x0212/S) et le centre (cf. ADES 08037x0398/F1, BRGM 08037x0436/S1 ; 08037x0704/S3) du tunnel de la Ramade, on trace la coupe altimétrique (Figure 131) pour mettre en évidence les communications possibles entre la nappe et le tunnel. D'après la coupe, et le niveau piézométrique théorique moyen, on observe que le tunnel est susceptible de drainer la nappe sur la partie sud du tunnel entre le PM 8 et le PM 15 observe que st supérieur au tunnel.



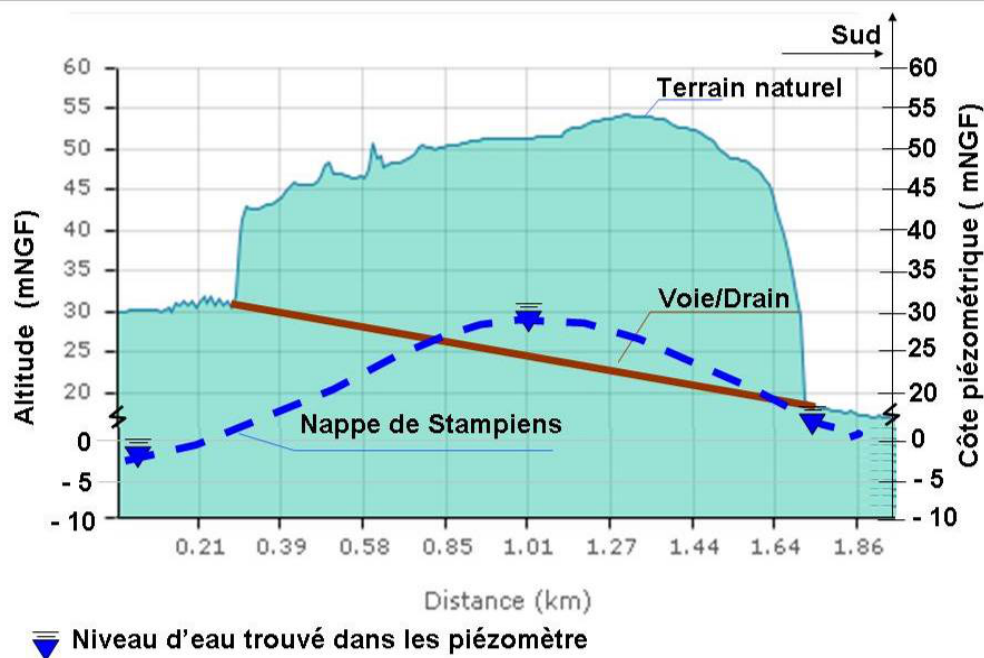


Figure 131: Coupe du sol autour de tunnel de La Ramade

Dans la zone étudiée, on trouve deux qualitomètres (cf. ADES 08037x0429/F2; BRGM 08037x0398/F1) qui indiquent que l'eau de la nappe de l'oligocène a un faciès hydrochimique de type hydrogénocarbonaté calcique (cf. notice BRGM 0803N). Le Tableau 79 synthétise les résultats d'analyse de l'eau dans le tunnel et aux sorties. Les données sont exprimées en valeur moyenne. On voit d'après ces résultats que la chimie de l'eau dans le tunnel varie peu tout au long du tunnel : variation du pH inférieure à 0.2 unités, celle de la conductivité inférieure à 10%, chaque ion majeur reste dans une gamme de grandeur qui ne varie pas plus de 1 mM.

Par contre, la chimie de l'eau souterraine en amont (sortie Nord), au milieu et en aval (sortie sud) ont des caractéristiques différentes : au Nord, l'eau est plus minéralisée avec une conductivité plus forte. Elle a un faciès hydrogénocarbonaté calcique, mais riche en sodium. Au centre, l'eau est moins chargée, elle a toujours le même faciès que celle précédente, mais deux fois plus riche en sodium. Au sud, l'eau est aussi moins chargée que celle au nord, elle a toujours le faciès hydrogénocarbonaté calcique et des caractéristiques proches de celle dans le tunnel.

Tableau 79: La comparaison de la chimie des eaux à l'intérieur et autour du tunnel de La Ramade

Moyenne	pH	T°C	25 µs/c	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	Cl-	NO3-	SO42-	Alc	Date éch.
Déblais sortie sud	8.13	24	873	2.41E-03	1.32E-04	2.48E-03	6.10E-04	1.94E-03	5.02E-04	9.65E-04	4.28E-03	01/07/2015
tunnel sortie sud	7.97	17	970	2.38E-03	1.16E-04	3.41E-03	6.02E-04	1.77E-03	3.19E-04	9.21E-04	6.08E-03	01/07/2015
centre de tunnel	7.89	17	872	2.11E-03	6.54E-05	3.00E-03	5.02E-04	1.68E-03	4.02E-04	9.41E-04	5.03E-03	01/07/2015
piézomètre centre	8.6	35	815	1.15E-02	4.87E-04	1.00E-03	9.71E-04	4.70E-03	6.66E-04	2.94E-03	3.60E-03	27/02/1969
tunnel sortie Nord	7.81	20	790	1.39E-03	9.26E-05	2.94E-03	6.74E-04	9.30E-04	7.74E-04	8.89E-04	5.10E-03	01/07/2015
piézomètre Nord	7.40	24	1362	5.79E-03	2.91E-04	2.57E-03	1.52E-03	3.49E-03	2.11E-06	3.32E-03	4.02E-03	1970 - 2017 valeur moyenne
NB: la concentration des ions sont en mol/l												

Cette différence de la chimie d'eau interne-externe du tunnel de la sortie nord jusqu'au centre du tunnel souligne que l'eau dans le tunnel ne vient pas de la nappe de l'oligocène dans le premier tronçon du tunnel. La consistance de la chimie d'eau interne-externe du tunnel de la sortie sud confirme aussi l'impacte de cette nappe sur le tunnel dans ce dernier tronçon du tunnel. Cette observation chimique est cohérente avec l'observation de la coupe altimétrique.

## 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

### Parois et Système du drainage

L'intrados du tunnel est fait de moellons calcaires couverts par endroits de béton projeté (Figure 132). Les caniveaux de piédroits (Voie 1 et Voie 2) présentent une spécificité liée à la problématique de carbonatation. Il semble que ces caniveaux aient été réalisés spécifiquement comme solution pour réduire le risque de précipitation carbonatée.

En effet les couvercles également en béton ont été scellés sur les caniveaux certainement pour limiter le phénomène de dégazage. Des trous de diamètre environ 10 cm et espacés de 20 m environ ont été réalisés à la scie cloche dans ces couvercles, a priori pour permettre de vérifier l'état de colmatage des drains. Le tunnel est également équipé d'un caniveau central collectant l'eau des caniveaux piédroits.

## 2.4 Observation du terrain

### Etat du colmatage

Tout au long du tunnel, on observe un écoulement d'eau dans les caniveaux. Du fait de la présence de dépôts carbonatés au fond du caniveau, on observe une surélévation du fil d'eau qui entraîne un débordement des écoulements par les trous de scie cloche avec une inondation de plateforme consécutive. Des dépôts en forme de billes sphériques de diamètre de quelques mm à cm sont également observés sur le couvercle des caniveaux de piédroits.

Les parois revêtues en béton projeté sont propres et sèches. Au niveau des revêtements en moellons calcaire, se forment des concrétions allant de quelques mm à 5 cm d'épaisseur, leur hauteur est généralement de 1 m 90 à 2m. Elles se forment le long des barbacanes, et peuvent s'allonger sur 20 m de longueur. Elles sont de couleur blanche à légèrement ocre. Il y a légèrement plus d'incrustation en parois V1 que V2.

## 3. Analyse d'eau et dépôt

« Les eaux de l'Oligocène sont caractérisées par un faciès hydrogénocarbonaté calcique à minéralisation modérée. La température des eaux de la nappe oligocène varie entre 13,5°C et 18°C selon les profondeurs de captage. Les conductivités sont comprises entre 200 et 600  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  dans la zone captive alors que dans les secteurs où la nappe est sub-affleurante et à proximité du littoral, les valeurs mesurées peuvent être plus fortes » (cf. <http://sigesaqi.brgm.fr/Oligocene.html>).

La campagne de terrain a eu lieu l'après-midi du 01/07/2015). La Figure 132 présente le plan de mesures et d'échantillonnage. L'échantillonnage de l'eau (S1 à S14) est fait au niveau des joints de parement en paroi et au fond du caniveau, nommé de, et les échantillons de dépôts sont prélevés dans les caniveaux (E1 à E3) et en paroi (E4 à 6).

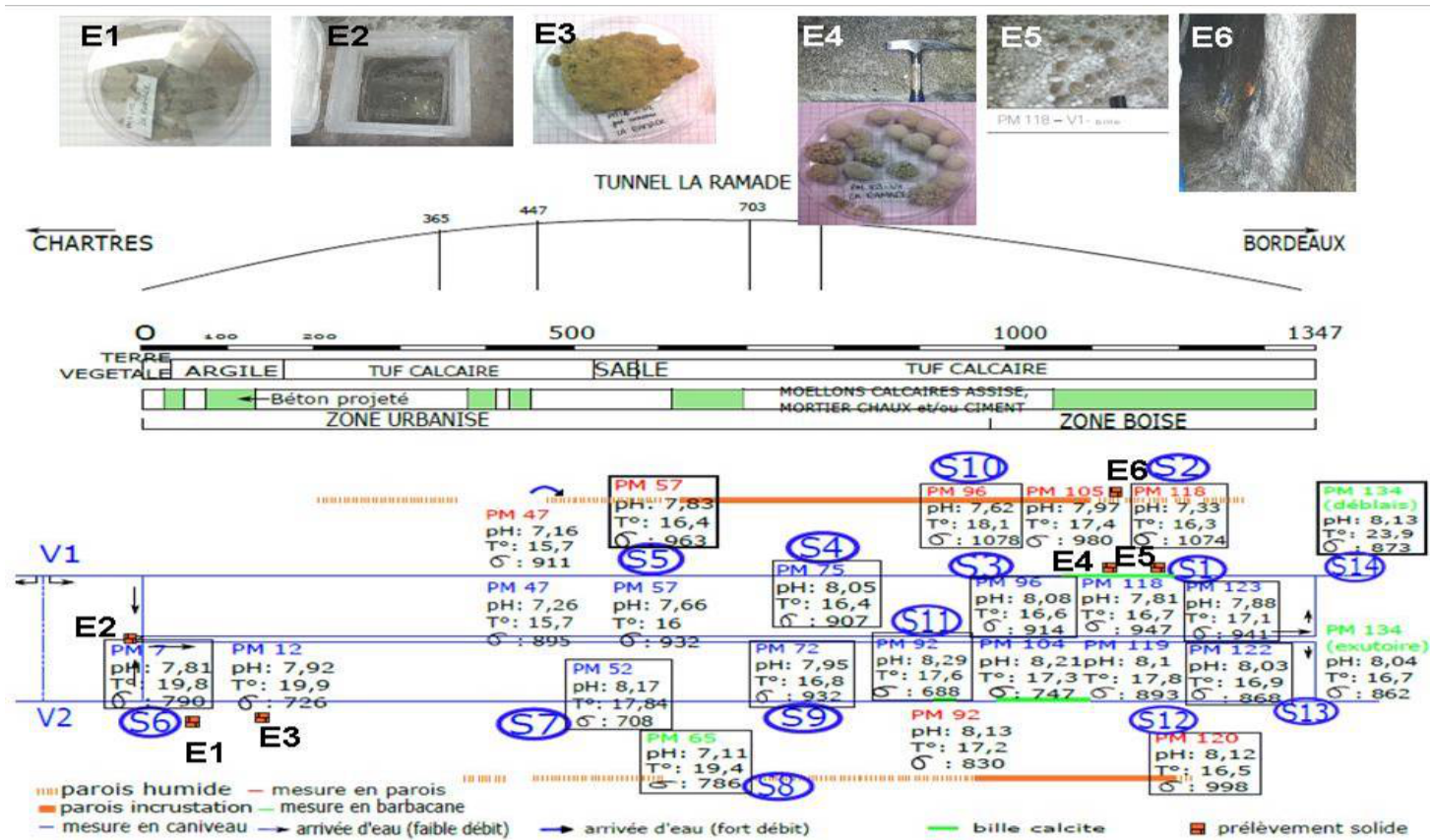
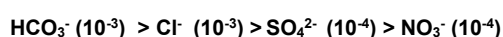
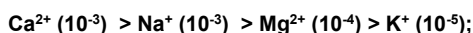


Figure 132: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de La Ramade

L'eau dans le fossé a un pH variant de 8 ( $\pm 0,2$  pH), une température variant de 16,4 à 19,8 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau est entre 688 à 941 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  selon le tronçon. L'eau en paroi a un pH variant de 7,11 à 8,13 ( $\pm 0,2$  pH), une température variant de 16,3 à 23,9 ( $\pm 0,5$  °C) et une conductivité variant de 595 à 878 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs pour ces eaux sont listés ici dans l'ordre de concentration décroissante, le détail des analyses est consultable à l'annexe 6:



D'après les mesures de pH, T°C et de C25 réalisées ponctuellement dans les deux caniveaux (Figure 132), on voit que le pH de l'eau en paroi est plus faible que celui de l'eau s'écoulant dans les caniveaux. La température est plus élevée dans l'extrémité du tunnel. La conductivité est très variable selon le tronçon considéré : sa valeur est plus élevée dans la zone de la géologie tuffeau et de paroi en béton projeté. Pour un même PM, l'eau montre une différence de la chimie avec un fort d'écart de mesure ( $>10\%$ ) selon le caniveau considéré.

5 échantillons de dépôts ont été analysés par Diffraction aux Rayon-X. Les résultats d'analyse sont illustrés à la Figure 133. Le dépôt dans le caniveau côté voie 2 au PM 7 (E1) se compose de quartz (57%), calcite (33%), orthoclase (5%), albite (4%) et dolomite et hématite inférieurs à 1%. Cependant, le dépôt au même PM dans le caniveau central (E2) est composé de 100% de calcite. Le dépôt dans le caniveau côté voie 2 au PM 18 (E3) se compose de calcite (90%) et de quartz (10%).

Des traces de goethite ( $<1\%$ ) expliquent probablement la couleur ocre. Des dépôts en billes sphériques au PM 113 côté V1 sur le couvercle de caniveau en piedroit de paroi présentent deux types : billes de surface rugueuse (E4\_1) et de surface lisse (E5). Celui de la surface rugueuse compose de calcite (80%), de quartz (13%) et de 7% d'anorthoclase.

Les billes de surface lisse se composent de calcite (91%) et de quartz (9%). Les billes trouvées dans la même zone au PM112 côté voie 1 et voie 2 (E4\_2) sont constituées de 100% de calcite.

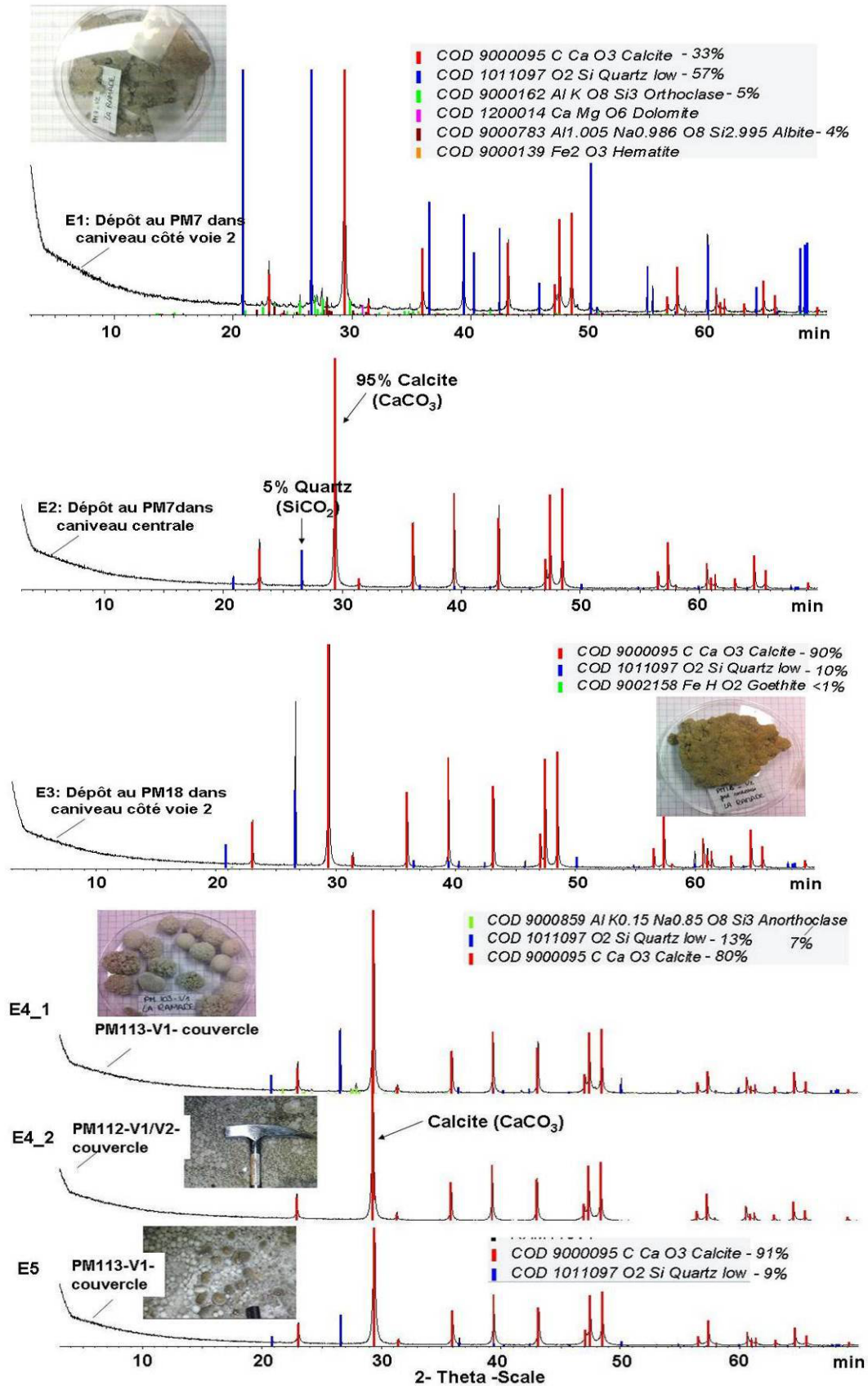


Figure 133: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de La Ramade



## Tunnel Bréval

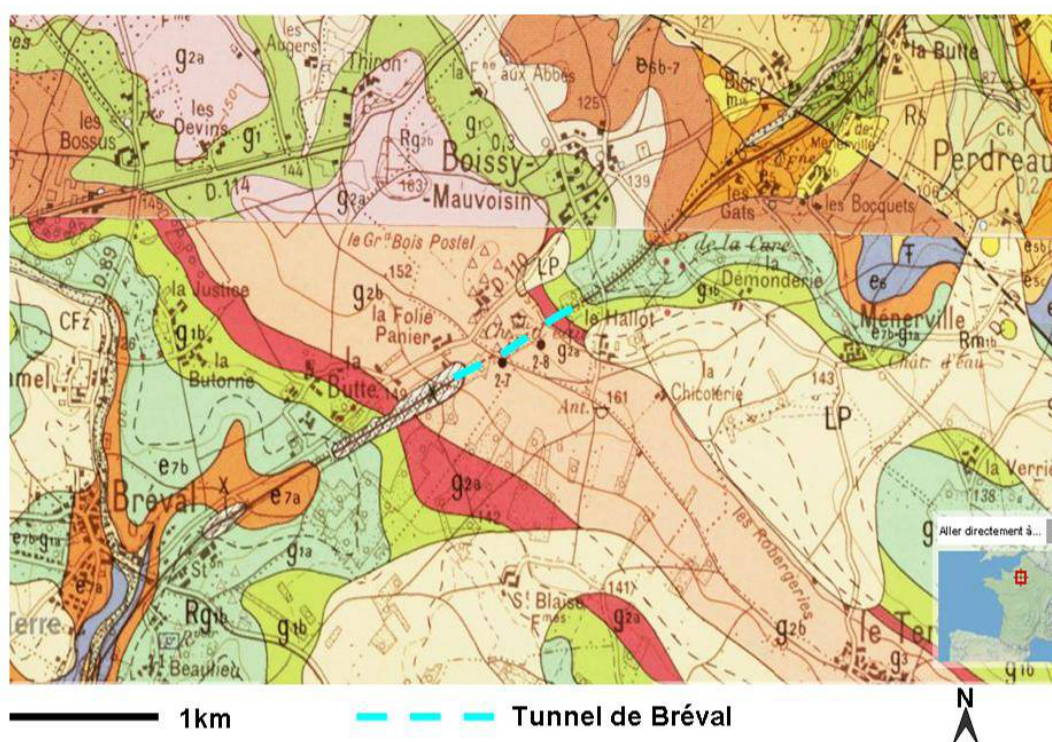
### 1. Localisation

Le tunnel se situe au Sud de Mantes la Jolie et au Nord de Bréval sur la ligne numéro 366 000 vers Cherbourg - Octeville, entre les PK 67+98 et PK 68+78. La longueur du tunnel est de 804 m.

### 2. Contexte du site

#### 2. 1 Géologie

La géologie locale change successivement de l'extrémité de Mantes La Jolie vers la sortie de Bréval dans l'ordre suivant (les informations sont issues de la notice géologique de la carte géologique 1/50 000 du BRGM (Figure 134):



**g1b.** Stampien inférieur de faciès calcaire silicifié.  
**g2a.** Stampien (s.s.) de faciès marneux ou argileux.  
**g2b.** Stampien (s.s.) de faciès sableux

Figure 134: Carte de la géologie autour du tunnel de Bréval (BRGM, notice de carte géologique 1/50 000)

Stampien inférieur (g1b) de faciès calcaire silicifié, c'est une mixture de la formation de Brie (meulières, calcaire et marnes) et Calcaire de Sannois. A Bréval, les sondages effectués près du tunnel ferroviaire montrent une couche de 2 à 3 m de sables très colorés, bariolés, localement carbonatés ou riches en lits d'argile beige, souvent plus ou moins grésifiés, passant latéralement à un banc de grès dur, compact, blanc grisâtre.

Stampien S.S. (g2a) de faciès marneux ou argileux, cette formation a des faciès marneux ou argileux dominants. L'épaisseur totale de ces faciès marneux et argileux est variable : de 2,5 à 7 mètres.

Stampien S.S. (g2b) de faciès sableux, c'est essentiellement la formation des sables de Fontainebleau. L'épaisseur de la formation sableuse se réduit progressivement du Sud-Est (50 m en maximale) vers le Nord-Ouest (25 m en minimale).

## 2.2 Hydrogéologie

A partir de données ADES du BRGM (01516X0004/S1 ; 01812X0002/S1) et des informations issues de la carte des isopièzes (Figure 135), dans la zone étudiée, on observe la présence de deux nappes : la nappe du Lutétien/yprésien qui est à une altitude de 100 mNGF en moyenne et la nappe de la Craie qui est beaucoup plus profonde à une altitude de 40 mNGF en moyenne.

Ci-dessous on rappelle les caractéristiques générales de ces deux nappes en incluant les faciès hydrochimiques qui pourront servir à comparer la qualité des eaux du tunnel dans les fossés de piédroits du tunnel de Bréval.

Nappe du Lutétien (Figure 136): Il s'agit de petites nappes localisées à la base des principales buttes de sables stampiens, quand les niveaux argileux de base sont suffisamment développés pour former une couche imperméable. Ce sont le plus souvent des lentilles aquifères suspendues, fluctuant beaucoup en fonction de la pluviométrie et parfois même temporaires, donnant surtout des suintements diffus au niveau de la base des sables, et parfois quelques petites sources. Ceux de Millemont (01516X0004/S1 ; 01812X0002/S1 : forage 181-8-9) fournissent des eaux très peu minéralisées (dH = 4° à 4,5° ; alcalinité en CaO = 36 à 40mg/l), un peu acides (pH = 6,2 à 6,3), agressives.



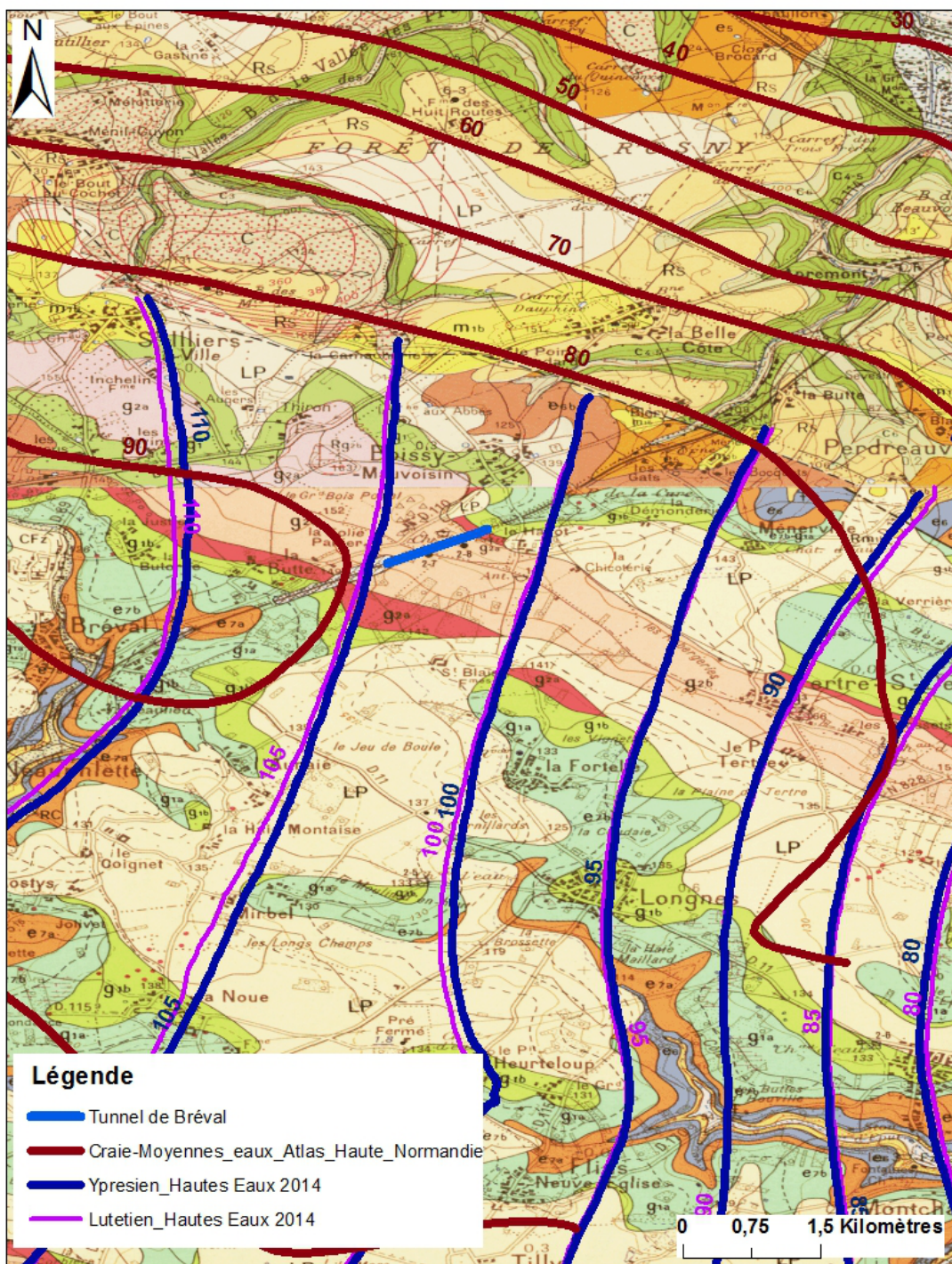


Figure 135: Carte piézométrique (ou carte des isopièzes) au niveau de tunnel de Bréval

Nappe de la craie (Figure 136) : L'existence d'une nappe aquifère dans la craie est liée à sa fissuration, qui se développe essentiellement lorsque la craie est affleurante

ou seulement recouverte de terrains perméables. Dans la zone près de tunnel, Nappe de la craie constitue la seule ressource en eau souterraine, elle se trouve à environ 20 m de profondeur. D'après le forage de Soindres (01516X0004/S1 ; 01812X0002/S1 : forage 181-3-6), qui capte la nappe de la craie à la cote 4- 39 m NGF.

Une analyse des eaux de cette source a donné les valeurs suivantes : dH = 32°8 ;  $\rho$  à 20° = 1820  $\Omega$  ; pH = 7,36 ; avec, en mg/l : Ca = 99 ; Mg=19,4 ; Na = 10,6 ; K = 2,1 ; Fe = 0,08 ; HC03= 348,3 ; S04= 21,4 ; Cl = 24 ; N03= 24 ; ces caractéristiques ne s'écartent pas nettement de celles des eaux des calcaires éocènes. Le nouveau forage d'Auffreville-Brasseuil (01516X0004/S1 ; 01812X0002/S1 : forage 181-4-41), en fond de vallée, fournit des eaux plus minéralisées : dH = 36°5 ; pH = 7,1 ; avec en mg/l : S04= 64 ; Fe.= 0,10 ; H2S = 1,3.

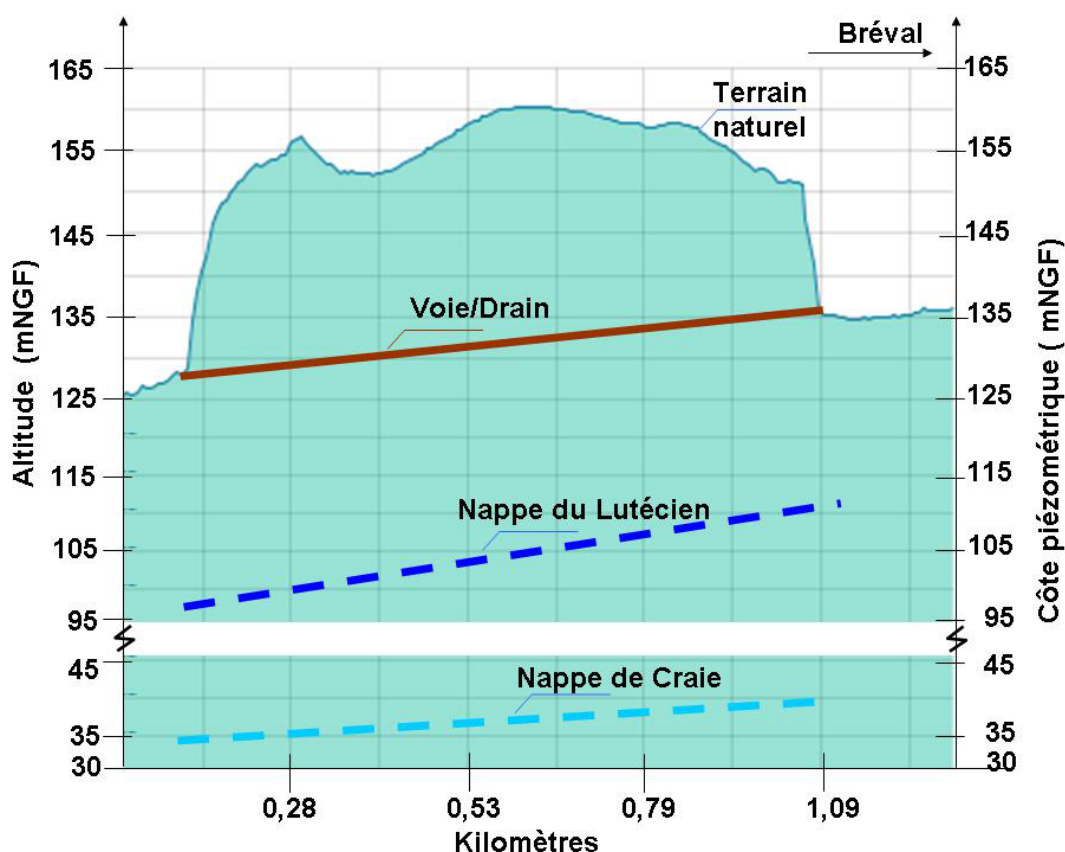


Figure 136: Coupe du sol autour de tunnel de Bréval

La Figure 136 présente les données altimétriques du tunnel étudié avec les informations piézométriques de la zone, on observe les deux nappes qui sont présentes le long du tunnel et qui n'ont à priori aucun impact sur la ligne ferroviaire. Cette conclusion est confirmée par les données de remontée de nappe (données



BRGM) (Figure 137) qui montre qu'on se situe dans une zone à risque très faible voir inexistant.

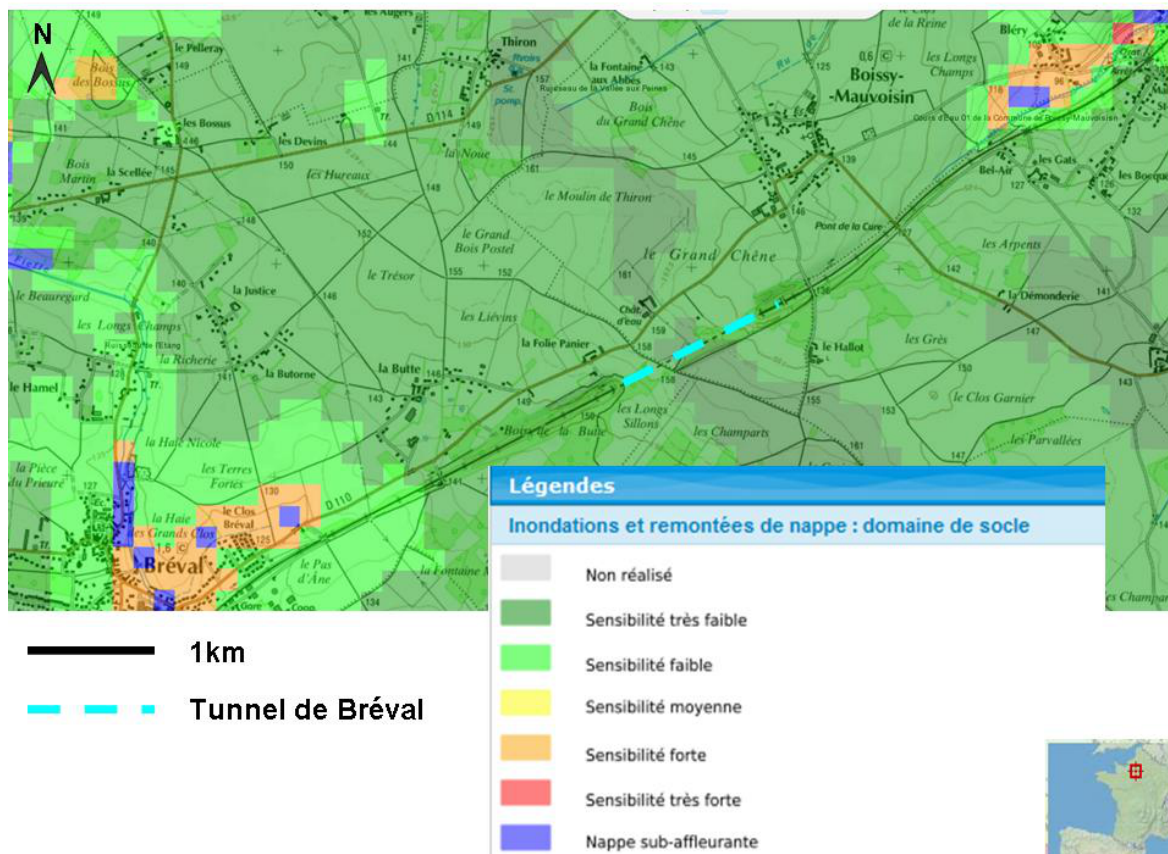


Figure 137: Carte du risque de remontée de nappe au niveau de tunnel de Bréval

A partir des données d'analyse de la chimie des eaux dans le piézomètre (Données ADES, réf : 01516X0008/HY1), et du qualitomètre (Données ADES, réf. : 01812X0004/S1), on montre la comparaison de l'eau de nappe et l'eau émergée dans le tunnel de Bréval dans la Figure 138.

On observe qu'il y a une grande différence de la concentration des ions caractéristiques comme sulfate, nitrate et chlorure qui montrent que l'eau présente dans le tunnel vient de la surface au lieu de la nappe.

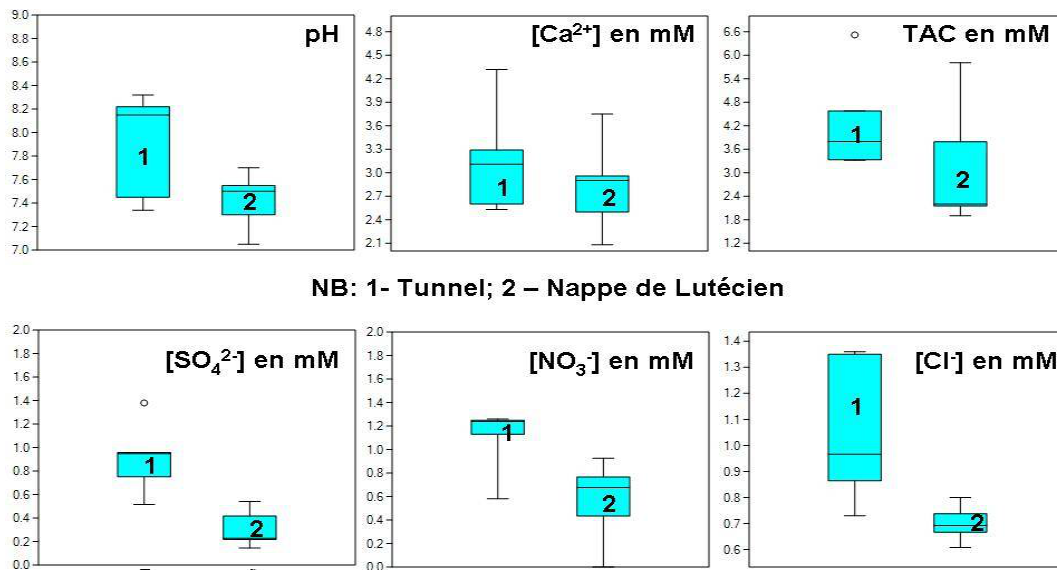


Figure 138: Comparaison de l'eau émergée dans Tunnel et celle de nappe Lutécienne

## 2.3 Ouvrage d'art et système drainage

### Parois et Système du drainage

Le revêtement intérieur du tunnel est hétérogène. Il y a alternance de brique et de béton. Les barbacanes en paroi sont espacées tous les 10 m tout le long du tunnel.

Le tunnel est équipé de caniveaux latéraux en piedroit de la paroi pour drainer la plateforme et l'extrados. Ils sont généralement en béton, peu profond (<30 cm). Mais dans certaines zones, on trouve sur site que le fond de caniveau est refait en PVC (du PM 10 au PM30 d'environ côté Voie 2). Le caniveau central en béton collecte l'eau venue des deux caniveaux latéraux. L'exutoire est du côté de Mantes la Joie.

## 2.4 Observation du terrain

### Etat du colmatage

Au fond du caniveau du côté de la voie V2, il y a présence de dépôts durs et blancs. Le débit est très variable selon les tronçons. En tête de tunnel côté Cherbourg, il n'y a pas d'écoulement dans les caniveaux de piedroits entre les PM 700 au PM 800. L'état du caniveau côté V1 ressemble celui de caniveau côté Voie 2.

Tout le long du tunnel, la paroi est quasi-sèche, et l'on observe peu d'écoulement dans les barbacanes. Cependant, il y a 2 principales arrivées d'eau sur la paroi en PM 10 et PM 68 côté voie V1 et V2. Ces deux arrivées d'eau se situent dans la zone de géologie du calcaire de Champigny. Des dépôts blancs et durs sont observés dans ces barbacanes humides en paroi.

### Test du traitement dans les barbacanes de la paroi

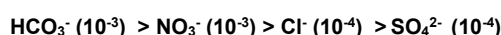
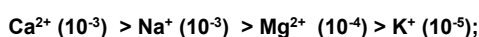
Dans ce tunnel, une solution de traitement préventif similaire à celui réalisé dans le tunnel de Marseille a également été testée depuis l'été 2014 dans les barbacanes des parois (Rousse, 2015). Nous n'avons pas accès à la notice du produit mais a priori il s'agit d'acide également d'acide aspartique, d'après nos observations de terrain. Ce test est moins conséquent que celui réalisé sur le tunnel de Marseille.

### 3. Analyse d'eau et dépôt

L'eau de la nappe du calcaire Champigny est chargée de sulfate et nitrate, et la dureté est élevée (35 à 40 °f).

La visite de terrain a eu lieu le 12/06/2015. L'échantillonnage d'eau a été réalisé au niveau de la paroi et au fond du caniveau le 12/06/2015. Les échantillons d'eau sont nommés de S1 à S7. S1 et S3 ont été prélevés au niveau de la paroi, le reste a été échantillonné dans les caniveaux de piédroit. Les échantillons de dépôt nommés d'E1 à E3 ont tous été échantillonnés dans les caniveaux latéraux (Figure 139).

L'eau dans le fossé a un pH variant de 8,2 ( $\pm 0,2$  pH), une température variant de 12,4 à 14,1 ( $\pm 0,5$  °C). La conductivité de cette eau se situe entre 674 et 834 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  selon les tronçons. L'eau prélevée au niveau de la paroi (barbacanes) a un pH variant de 7,4 ( $\pm 0,2$  pH), une température variant de 11,4 à 15,8 ( $\pm 0,5$  °C) et une conductivité variant de 930 ( $\pm 25$ )  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les ions majeurs pour ces échantillons d'eaux sont listés ici dans l'ordre de concentration décroissant, le détail des analyses est consultable à l'annexe 6:



Selon les mesures ponctuelles de pH, de T°C et de C25 le long des deux caniveaux (Figure 139), on voit que le pH de l'eau en paroi est plus faible que celui de l'eau dans les caniveaux. La température est plus élevée dans l'extrémité du tunnel. La conductivité est très variable selon les tronçons de tunnel considérés : les valeurs sont plus élevées dans la zone de la géologie du calcaire de Brie. A partir

du PM 560, l'eau dans les caniveaux côté V1 a une conductivité plus forte que celle de V2, mais dans la zone devant, c'est l'inverse (C25 : V2 > V1).

Les résultats d'analyse de la Diffraction aux RX des dépôts échantillonnés en différents points du caniveau de piedroit côté voie 1 ont été illustrés dans la Figure 140. Le dépôt du PM 10 (E1) se compose de quartz (50%), feldspaths (31%), muscovite (16,5%), ces minéraux étant spécifiques de roches siliceuses de type granit. Les carbonates complètent la séquence minérale, mais restent en faible fraction : calcite 2% et dolomite 0,5%. Étant donné la géologie calcaire dans l'encaissant du tunnel le faciès carbonaté calcique, ce dépôt doit provenir d'un morceau de ballast tombé dans le caniveau et recouvert par une concrétion.

Les dépôts échantillonnés dans le caniveau au PM 28 (E2) et PM 47 (E3) se composent des mêmes phases minérales : 65% en calcite et 35% en quartz.



Resultats breval

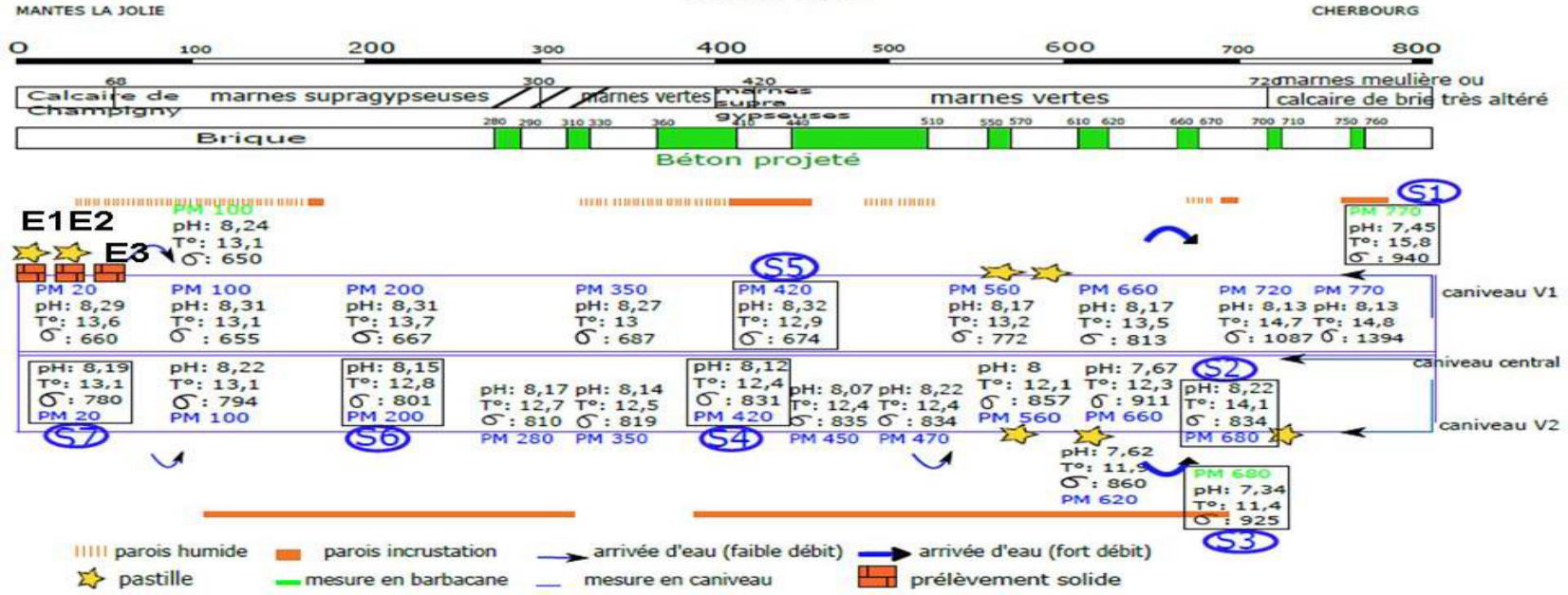


Figure 139: Plan d'échantillonnages dans le tunnel de Bréal

**DRX en poudre – Bréval**

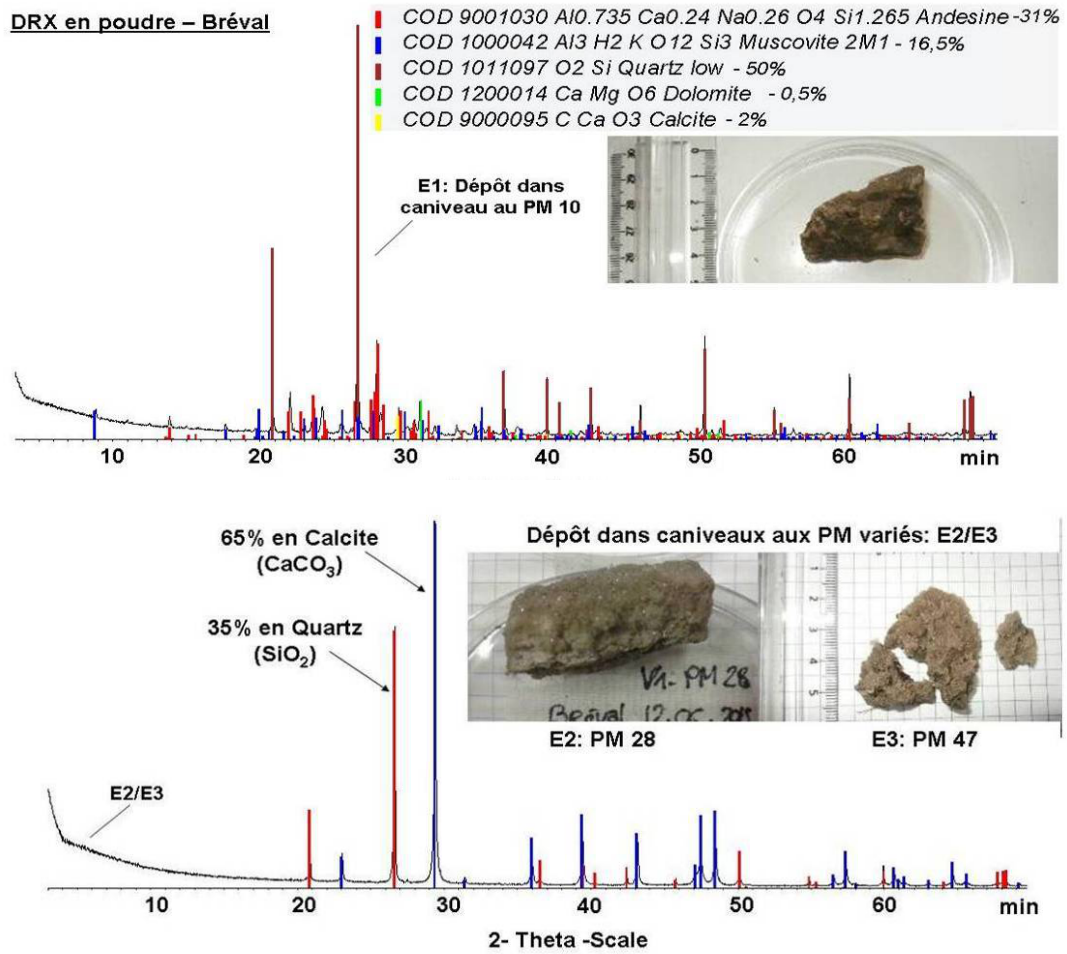


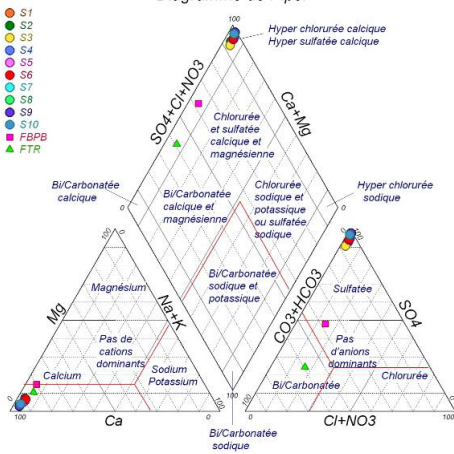
Figure 140: Analyse DRX- dépôts du fossé dans tunnel de Bréval



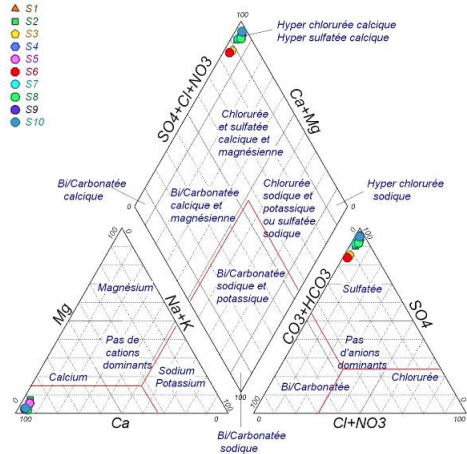
## Annexe7 : Analyse d'eau – état thermodynamique - Chauconin

### Diagramme de piper de 5 campagne d'eau - Chauconin

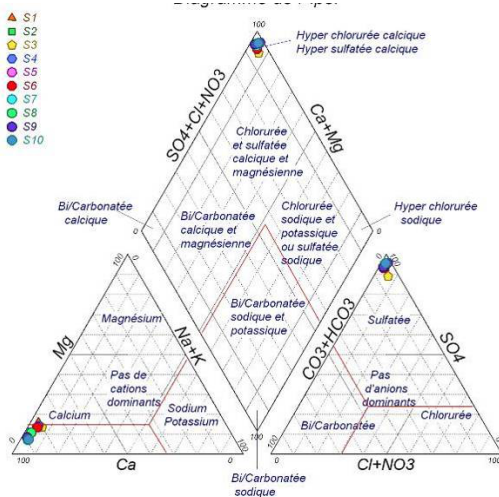
Campagne du 12/12/2013



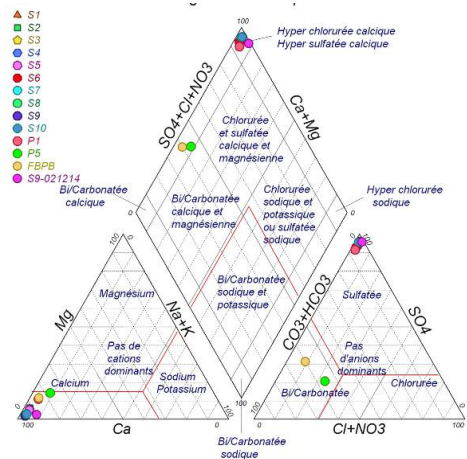
Campagne du 02/06/2014



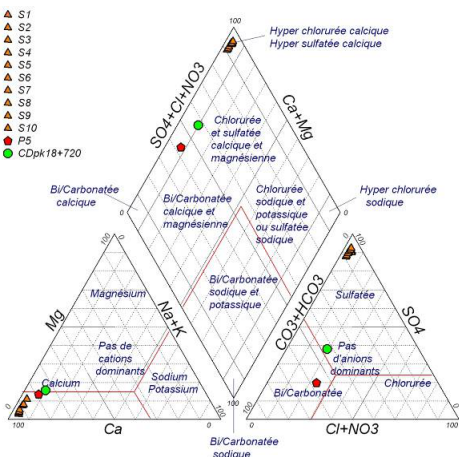
Campagne du 19/11/2014



Campagne du 17/03/2015



Campagne du 08/07/2015



NB : numérotation d'échantillon

Tronçon 2 : S1-S10 : de 9 regards et de lexutoire du collecteur drainant (CD) où se trouvent piézomètre P1 (eau de la plateforme);

Tronçon 1 fossé béton préfabriqué à barbacanes dans le déblai où se trouve piézomètre P5 (eau de nappe de calcaire de Saint-Ouen) ;

FTR : fossé terre revêtu près de P5 ;

CDpk18+720 : CD près de P5 ;

## Fiche d'entrée de Phreeqc – modélisation inverse

```

Fiche 1 : Source de l'eau du CD
SOLUTION 1 # pluie Chauconin 19/02/2016
-units mmol/L
  pH 7.87
  temp 6.1
  Ca 0.0586
  Mg 0.026
  Na 0.229
  K 1.08
  S(6) 0.0764
  Cl 1.32
  N(5) 0.073
  C(4) 0.02754
SOLUTION 2 #eau de la plateforme (P1-17/02/2015)
units mmol/l
  pH 7.6
  temp 10.4
  Ca 15.6
  Mg 2.06
  Na 1.43
  K 0.162
  S(6) 16.5
  Cl 0.433
  N(5) 0.372
  C(4) 2.22
SOLUTION 3 #eau de la nappe CSO (P5- 23/03/2016)
-units mmol/L
  pH 7.55
  temp 10.8
  Ca 4.4
  Mg 0.826
  Na 0.767
  K 0.0273
  S(6) 1.11
  Cl 1.93
  N(5) 0.729
  C(4) 6.34
SOLUTION 4 #eau du CD (S3 - 08/07/2015)
-units mmol/L
  pH 7.74
  temp 17.5
  Ca 6.373
  Mg 0.245
  Na 0.304
  K 0.118
  S(6) 5.924
  Cl 0.388
  N(5) 0.021
  C(4) 1.279
INVERSE_MODELING 1
-solutions 1 2 3 4
-uncertainty 0.05
-range
-phases
  Halite
  Quartz
  Gypsum
  Illite
  Kaolinite
  Ca-montmorillonite
  CO2(g)
  Amm(g)
  N2(g)
  Calcite
  Dolomite
  lime
-balance
Ca 0.025 0.025 0.025 0.025
S(6) 0.025 0.025 0.025 0.025
C(4) 0.025 0.025 0.025 0.025
PHASES
  Lime
  CaO + 2H+ = Ca+2 + H2O
  log_k 32.6993
  delta_h -193.91 kJ
  END

```