



HAL
open science

Etude des pertes des réseaux d'eau potable (ROC)

Denis Gilbert, Théophile Hémion, Alain Husson

► **To cite this version:**

Denis Gilbert, Théophile Hémion, Alain Husson. Etude des pertes des réseaux d'eau potable (ROC). INRAE UR ETTIS. 2022, pp.77. hal-04701799

HAL Id: hal-04701799

<https://hal.inrae.fr/hal-04701799v1>

Submitted on 18 Sep 2024

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.



Études des pertes de réseau AEP

RAPPORT FINAL 2022

Gilbert, Hémion, Husson Unité ETTIS

INRAE NOUVELLE AQUITAINE BORDEAUX

50 Avenue de Verdun, 33610 CESTAS

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|----|
| Table des matières..... | 1 |
| Liste des abréviations | 3 |
| Liste des figures | 4 |
| Liste des tableaux | 6 |
| Liste des annexes | 7 |
| I. Introduction | 8 |
| II. Étude bibliographique..... | 10 |
| 1. Origine et classes | 10 |
| 1.1. Facteurs de fuites | 10 |
| 1.2. Classification..... | 10 |
| 2. Modélisation du comportement de la fuite..... | 11 |
| 1.1. Mise en équation | 11 |
| 1.2. Coefficient de décharge..... | 12 |
| 1.3. Impact du milieu environnant..... | 14 |
| III. La fuite à l'échelle du pilote | 16 |
| 1. Boucle hydraulique & Caissons..... | 16 |
| 1.1. Caisson sol - CS..... | 17 |
| 1.2. Caisson eau - CE..... | 17 |
| 2. Paramètres mesurés | 17 |
| 1.1. Paramètres fixes..... | 17 |
| 1.2. Paramètres variables..... | 19 |
| 3. Les gammes de tuyau | 21 |
| 1.1. Matériaux | 21 |
| 1.2. Diamètre nominal..... | 22 |
| 1.3. Diamètre des fuites..... | 22 |
| 4. Protocole expérimental | 23 |
| 1.1. Préparation du tuyau | 23 |
| 1.2. Mise en place du pilote | 24 |
| 5. Exploitation des résultats..... | 26 |
| 1.1. Données de débit de fuite..... | 27 |

| | | |
|------|--|----|
| 1.2. | Établissement du modèle numérique | 33 |
| 1.3. | Données de déformation | 37 |
| 1.4. | Traitement d'image | 41 |
| IV. | Expérimentations sur réseau semi-réel | 44 |
| 1. | Le site d'étude | 44 |
| 2. | Protocole expérimental | 45 |
| 3. | Résultats | 46 |
| 1.1. | Profil type d'expérience | 46 |
| 1.2. | Débit et pression | 47 |
| V. | Quantification des fuites sur réseau AEP | 50 |
| 1. | Fonctionnement du dispositif | 50 |
| 1.1. | Boucle hydraulique | 50 |
| 1.2. | Paramètres mesurés | 51 |
| 1.3. | Protocole expérimental | 52 |
| 2. | Campagne de mesure | 53 |
| 1.1. | Critères de sélection des sites de mesure | 53 |
| 1.2. | Caractéristiques des sites de mesure | 54 |
| 1.3. | Traitement et analyse des mesures | 60 |
| 1.4. | Validité des mesures & Comparaison au modèle | 61 |
| VI. | Conclusion et perspectives | 64 |
| VII. | Bibliographie | 65 |
| | Annexes | 68 |

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP : Adduction en Eau Potable

BE : Bride Emboitement

BI : Branchement Incendie

CE : Caisson Eau

CS : Caisson Sol

CVM : Chlorure de Vinyle Monomère

DN : Diamètre Nominal

ETBX : Environnement & Territoire – Bordeaux

FAVAD : *Fixed And Variable Area Discharges*

GPIE : Gestion Patrimoniale des Infrastructures liées à l'Eau

IWA : *International Water Association*

OS : *Orifice/Soil number*

PI : Poteau Incendie

PEBD : Polyéthylène Basse Densité

PEC : Prise En Charge

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PN : Pression Nominale

PVC : *PolyVinyl Chloride*, Polychlorure de vinyle

ROC : Renouvellement Orienté des Canalisations

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Pilote fuite - hall technique..... | 8 |
| Figure 2 : Dispositif de mesure mobile à l'essai - OIEAU..... | 9 |
| Figure 3 : Représentation des différents types de fuites | 11 |
| Figure 4 : Schéma reliant l'hydraulique des fuites, du comportement structurel et de l'hydraulique des sols..... | 15 |
| Figure 5 : Synoptique du pilote | 16 |
| Figure 6 : Courbe caractéristique du système de pompage associée au pilote | 18 |
| Figure 7 : Répartition des matériaux sur le linéaire total (<i>Husson et al., 2020</i>)..... | 21 |
| Figure 8 : Répartition des DN sur le linéaire total | 22 |
| Figure 9 : Schéma de positionnement des jauges vis-à-vis de l'orifice de fuite | 24 |
| Figure 10 : Jauges de contrainte avant (à gauche) et après (à droite) imperméabilisation | 24 |
| Figure 11 : Vidange du caisson par aspiration | 25 |
| Figure 12 : Influence des matériaux et du diamètre de l'orifice sur le débit de fuite | 28 |
| Figure 13 : Débit de fuite en fonction de la pression suivant les trois températures | 29 |
| Figure 14 : Débit de fuite en fonction de la température pour le matériau PEHD | 30 |
| Figure 15 : Schéma de la répartition des points de mesure de compactage sur le CS – coordonnées en cm | 31 |
| Figure 16 : Ensemble des expériences menées sur CS comparées au CE..... | 32 |
| Figure 17 : Comparaison du modèle établi pour chaque matériau aux données du CE..... | 35 |
| Figure 18 : Comparaison de la vitesse de flux entre PVC et PEHD..... | 35 |
| Figure 19 : Comparaison du modèle établi avec les données du CS..... | 36 |
| Figure 20 : mesure de déformation..... | 37 |
| Figure 21 : Analyse de déformation – Effet de débit et pression pour de haut en bas : PVC, Fonte et PEHD..... | 38 |
| Figure 22 : Analyse de déformation - effet de température pour de gauche à droite : PVC, Fonte et PEHD..... | 39 |
| Figure 23 : Comparaison de la déformation entre paliers de descente (D) et de montée (M) | 40 |
| Figure 24 : dispositif de capture d'image | 41 |
| Figure 25 : Mesure de la surface de fuite selon différentes méthodes – E101 (PVC) | 42 |
| Figure 26 : Mesure de la surface de fuite – E202 (Fonte) | 42 |
| Figure 27 : Vaporisation à pressions hautes (supérieures à 4 bars) | 43 |
| Figure 28 : Schéma du réseau de l'office | 44 |
| Figure 29 : Extension du réseau réalisée fin 2019 | 45 |
| Figure 30 : Profil d'une mesure de fuite (ici F9) | 46 |
| Figure 31 : Valeurs des débits mesurés en comparaison du modèle..... | 47 |
| Figure 32 : Comparaison de débit de fuite à pressions variables..... | 48 |
| Figure 33 : Cuves (1), système de régulation de pression (2), entrée et sortie (3) et purge (4) du circuit d'eau..... | 50 |
| Figure 34 :Canalisations et appareils de mesure | 51 |

| | |
|--|----|
| Figure 35 : Réseau AEP autour de Saint-Yrieix-la-perche et abonnés des secteurs étudiés..... | 54 |
| Figure 36 : Secteur " Gare Nord Coussac" | 55 |
| Figure 37 : Secteur "Sud Gare Coussac" et ses sous-secteurs | 56 |
| Figure 38 : Secteur "La Roche l'abeille" | 57 |
| Figure 39 : Secteur "Freyssinet" | 58 |
| Figure 40 : Secteur "Saint Yrieix Aviateur" | 59 |
| Figure 41 : Débit de fuite du secteur S2 Gare Sud Coussac..... | 60 |
| Figure 42 : Comparaison des mesures par secteurs..... | 61 |
| Figure 43 : Modèle établi par rapport au débit minimum du secteur | 62 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Valeur du coefficient de décharge en fonction de la nature de l'orifice | 13 |
| Tableau 2 : Régulation en température du circuit hydraulique | 19 |
| Tableau 3 : Ordre de grandeur des caractéristiques mécaniques des matériaux | 21 |
| Tableau 4 : Protocole de collage des jauges de déformation..... | 23 |
| Tableau 5 : Protocole de mise en route des expériences sur pilote..... | 25 |
| Tableau 6 : Protocole expérimental des CS & CE..... | 26 |
| Tableau 7 : Ensemble des paramètres expérimentaux | 27 |
| Tableau 8 : Coefficient de régression du modèle par matériau..... | 34 |
| Tableau 9 : Protocole expérimental sur réseau de l'OIEau | 45 |
| Tableau 10 : Résultats de mesure raquette..... | 47 |
| Tableau 11 : caractéristiques des débitmètres utilisés | 51 |
| Tableau 12 : Protocole pour mesure sur réseau AEP | 52 |
| Tableau 13 : Debit de fuite mesuré sur les secteurs S1 à S5 | 61 |
| Tableau 14: Caractéristiques de fuite du secteur | 62 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Gamme des DN PEHD | 68 |
| Annexe 2 : Gamme des DN PVC PN10 & PN16 | 69 |
| Annexe 3 : Gamme des DN Fonte..... | 69 |
| Annexe 4 : Récapitulatif des expériences menées sur CS..... | 70 |
| Annexe 5 : Récapitulatif des expériences menées sur CE..... | 71 |
| Annexe 6 : Caractéristiques techniques du matériau de remblaiement CS | 72 |
| Annexe 7 : Essai de compactage au pénétromètre dynamique en CS | 73 |
| Annexe 8 : Essai de compactage au pénétromètre dynamique OIEau – PVC | 74 |
| Annexe 9 : Essai de compactage au pénétromètre dynamique OIEau - Fonte | 75 |
| Annexe 10 : Essai de compactage au pénétromètre dynamique OIEau - PEHD | 76 |

I. INTRODUCTION

L'équipe GPIE de l'unité ETBX basée à Bordeaux mène ses recherches dans le domaine de la gestion patrimoniale et technique des réseaux collectifs d'eau et d'assainissement. Elle participe entre autre aux travaux concernant la maîtrise des fuites dans les réseaux de distribution d'eau potable, ainsi qu'à la connaissance de l'évolution du patrimoine des réseaux d'eau potable et de son impact sur la qualité de service.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet ROC, « Renouvellement Orienté des Canalisations », qui a pour objectif de mener des recherches pluridisciplinaires pour développer des outils et des méthodes, axés sur deux problématiques : la maîtrise de la qualité de l'eau vis-à-vis du CVM, et la maîtrise des fuites diffuses dans les réseaux d'eau potable. Deux pilotes hydrauliques ont donc été conçus afin de mener des études expérimentales sur chacune de ces problématiques : le pilote 1, appelé pilote « Qualité », permettant l'analyse de CVM dans les tuyaux PVC d'avant 1980, et le pilote 2, appelé pilote « Fuite », traitant la problématique des fuites à l'échelle d'un tuyau. Le présent rapport est réservé à cette dernière problématique.

Notre étude porte sur l'influence des paramètres classiques établis dans un réseau AEP sur le comportement d'une fuite diffuse dans un environnement réel ou similaire. L'étude est réalisée à trois échelles distinctes : échelle d'une canalisation, échelle d'un réseau semi-réel, échelle d'un réseau réel.

La première partie de ces travaux est consacrée à l'étude comportementale de la fuite sur pilote, à l'échelle d'une canalisation. Le pilote a pour but de recréer les fuites diffuses sur un modèle réel, avec une série de paramètres variables (pression, débit, compactage du sol, etc.) permettant de reproduire les situations observées sur le terrain sur un dispositif unique.



FIGURE 1 : PILOTE FUITE - HALL TECHNIQUE

La deuxième partie porte sur l'étude de la fuite sur réseau semi-réel, c'est-à-dire dans un environnement réel mais où les principaux paramètres sont toujours contrôlés (débit d'entrée, pression, vannes, etc.) car réseau dépourvu d'abonnés. Cette partie permet de confirmer ou d'infirmer les résultats et conclusions tirés des travaux sur l'échelle précédente.

La dernière partie concerne la quantification de fuites en conditions réelles, impliquant l'utilisation d'un dispositif de mesure mobile dont le rôle est de mesurer avec précision les pertes d'une fraction isolée du réseau AEP.



FIGURE 2 : DISPOSITIF DE MESURE MOBILE A L'ESSAI - OIEAU

Afin de mieux comprendre le contexte de ces travaux, ces trois parties seront introduites par une étude bibliographique présentant les relations établies entre les paramètres régissant un réseau, l'influence des matériaux sur le comportement de la fuite, ainsi que l'interaction avec son environnement.

II. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. ORIGINE ET CLASSES

Les fuites sont définies comme les pertes occasionnées sur le réseau de distribution, c'est à dire sur la partie du système qui se situe entre les ouvrages de production et les compteurs des usagers. Leurs origines sont variées, elles peuvent être dues dans une majorité des cas à des fissures, fentes, trous mais peuvent également trouver leurs causes dans un déboitement de conduites, une craquelure, un effritement, un joint d'étanchéité défectueux, etc. (Fox, 2016).

1.1. FACTEURS DE FUTES

Les casses sont nombreuses et variées mais certains facteurs locaux les influencent fortement. Le niveau des pertes en distribution est fortement lié aux caractéristiques techniques et à l'environnement du système (Renaud et al., 2014 ; Van Zyl & Clayton, 2006) :

- La topographie, qui impacte les pressions de service.
- Le contexte géologique ou pédologique, qui exerce des contraintes mécaniques ainsi que des difficultés de repérage des fuites. Il est à noter que la nature du sol joue également un rôle important dans la dégradation du réseau avec des terrains pouvant avoir des propriétés corrosives.
- Le climat, provoquant des aggravations du risque de rupture de canalisation en période de gel ou de sécheresse pour les argiles.
- L'histoire de la construction (matériaux ou technologies se révélant problématiques).
- Leur positionnement, les contraintes exercées sur les tuyaux ne seront pas les mêmes dans un contexte urbain ou rural. En effet le trafic routier va générer des vibrations pouvant entraîner leurs casses.
- La qualité de l'eau, qui va être un facteur prépondérant dans l'apparition de fuite. En effet en fonction de son caractère entartrant ou agressif l'eau peut causer d'important dommages au cours du temps sur les conduites.
- La pression, qui intervient principalement dans l'évolution de la fuite avec une dilatation de l'orifice pour de fortes pressions (De Marchis et al., 2014).

1.2. CLASSIFICATION

Tout comme leurs origines, les fuites ne sont pas toutes identiques. Elles diffèrent en fonction du type de réseau sur lequel elles apparaissent (branchement, conduite de transport ou de distribution) et varient par leur intensité. Certaines ne sont que de simple suintement quand d'autre peuvent jaillir en surface générant de fortes perturbations. Les fuites peuvent ainsi prendre plusieurs formes, A. Lambert en définit trois grandes familles (Lambert, 1994) :

- Les **casses manifestes**, visible en surface par inondation ou par déformation du terrain. Ces dernières sont susceptibles d'engendrer des dégâts sur chaussée importants.
- Les **fuites détectables** mais non visibles depuis la surface du sol ;
- Les **fuites diffuses** qui ont des débits faibles et ne peuvent pas être détectées avec les techniques courantes de recherche de fuite ;

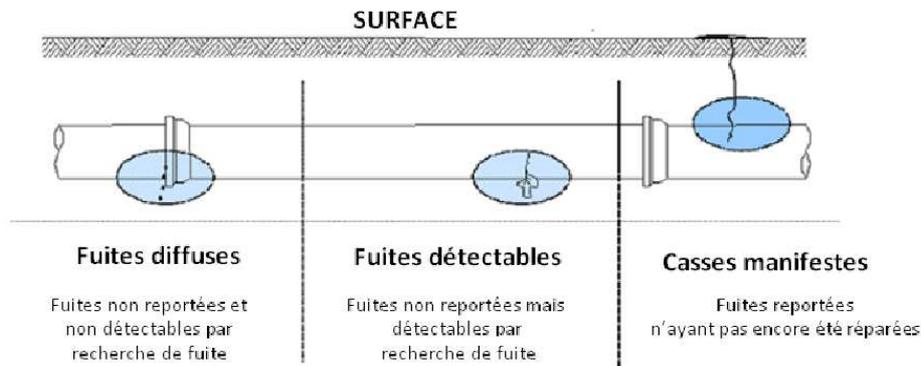


FIGURE 3 : REPRESENTATION DES DIFFERENTS TYPES DE FUITES

Cette distinction entre les fuites est primordiale dans la lutte contre les pertes en eau car les actions à mettre en œuvre diffèrent en fonction du type de fuites rencontrées et de leurs origines. En effet, les casses manifestes vont être signalées rapidement ce qui permettra une réparation ou un renouvellement (en fonction de leurs origines) rapide. Contrairement aux fuites diffuses invisibles en surface, qui ne peuvent être éliminées que par renouvellement.

2. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE LA FUITE

En fonction du système dans lequel on se trouve, le comportement d'une fuite va différer. Plusieurs paramètres interviennent dans l'écoulement volumique que constituent les pertes en eau.

1.1. MISE EN EQUATION

Les études antérieures établissent un lien solide entre le débit de fuite et la pression. La relation entre ces deux composantes est dérivée de la formule de Torricelli qui établit que le débit au travers d'un orifice dépend de la pression relative, d'un coefficient adimensionnel C_d et de la surface de l'orifice A , g étant l'accélération de la pesanteur (*Van Zyl et Cassa, 2014*).

$$Q_f = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot H}$$

- Q_f : débit de fuite en m^3/s
- H : pression relative en mC eau
- C_d : coefficient de décharge adimensionnel
- A : surface de l'orifice en m^2

- g : accélération de pesanteur en m/s^2

Mais cette loi, valable pour un orifice à surface fixe, ne s'applique pas à tous les cas de figures. Lorsque plusieurs fuites sont présentes et que la taille des orifices peut varier avec la pression, d'autres lois doivent alors être utilisées pour représenter les systèmes rencontrés sur le terrain. L'association internationale de l'eau (IWA) propose une équation de puissance où les paramètres a_I et b_I sont à caler pour chaque réseau à modéliser :

$$Q_f = a_I \cdot H^{b_I}$$

Le coefficient $a_I = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g}$ peut être relié au débit de fuite effectif à pression relative nulle $A_0 = C_d \cdot A$.

Des études de cas ont montré que l'exposant varie significativement entre 0,5 et 2,79 autour de la moyenne de 1,15 (*Farley & Trow, 2003*). Il dépend du type de fuite et du matériau constituant le tuyau et notamment de la rigidité conduisant à une déformation variable bien observée dans le PVC et le PE. Ces constats ont conduit au développement du concept FAVAD afin de considérer les variations de l'aire de l'orifice de la fuite en fonction de la pression. On obtient l'équation suivante :

$$A(H) = m \cdot H + A_0$$

- m : la pente de l'aire, fonction de la pression.

L'équation FAVAD en découlant tient donc compte de l'écoulement par la partie initiale de l'orifice et de l'écoulement par la partie en expansion de l'orifice (*Deyi et al., 2014*) :

$$Q_f = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (A_0 \cdot H^{0.5} + m \cdot H^{1.5})$$

Le concept FAVAD semble opérationnel à l'échelle d'une fuite ; des pistes ont été explorées pour l'étendre à l'échelle d'un secteur mais n'ont pas débouché à ce jour sur des méthodes prédictives opérationnelles. Des recherches restent donc nécessaires pour progresser dans la caractérisation du lien entre perte et pression. La question centrale est de développer un modèle prédictif de ce lien à l'échelle opérationnelle d'un secteur en fonction de ses caractéristiques (matériaux, types de sol, nappes...).

Pour valider ou améliorer l'équation FAVAD, différents travaux ont été menés qui se sont intéressés à l'influence du débit transitant dans la canalisation, du matériau, de la forme de l'orifice, du diamètre, ou encore du media environnant.

1.2. COEFFICIENT DE DECHARGE

Ce coefficient C_d est défini comme le rapport entre la décharge réelle et idéale à travers un orifice, en tenant compte des pertes d'énergie dues aux effets de la friction et de la contraction (*Massey & Ward-Smith, 2012*). Les données expérimentales sont généralement utilisées pour déterminer la valeur

de ce coefficient. Cependant, la difficulté à déterminer une valeur précise et représentative pour un type d'orifice se reflète dans la différence des valeurs publiées par plusieurs auteurs pour des configurations de fuites similaires (*Brater et al., 1996*).

| Nature de l'orifice | Cd |
|---------------------|-------------|
| Circulaire | 0,592-0,657 |
| Carré | 0,598-0,661 |
| Rectangulaire | 0,601-0,646 |

TABLEAU 1 : VALEUR DU COEFFICIENT DE DECHARGE EN FONCTION DE LA NATURE DE L'ORIFICE

REGIME D'ÉCOULEMENT

Le régime d'écoulement a une influence significative sur le coefficient de décharge C_d (*Fox, 2016*). Le nombre de Reynolds est un paramètre adimensionnel utilisé pour définir l'état d'un fluide, et représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses (*Fox & McDonald, 1978*). Il détermine le régime d'écoulement d'un fluide, qui peut être laminaire, transitoire ou turbulent.

$$R_e = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu}$$

- R_e : nombre de Reynolds adimensionnel
- V : vitesse caractéristique du fluide en m/s
- L : longueur caractéristique en m
- ρ : masse volumique du fluide en kg/m³
- μ : viscosité dynamique du fluide en Pa.s

Il est montré que pour des écoulements laminaires, le coefficient C_d augmente avec l'augmentation de R_e . En revanche, le coefficient de décharge n'est pas modifié de manière significative lors de l'application d'un régime d'écoulement turbulent (*Lambert, 2001*).

GEOMETRIE DU TUYAU

De nombreuses études (*Yoon et al., 2008 ; Rahman et al., 2009 ; Jan & Nguyen, 2010*) ont mis en évidence la relation liant le ratio entre le diamètre de l'orifice et le diamètre du tuyau, et le coefficient de décharge théorique.

ANGLE DE JET

Plusieurs recherches ont également montré l'influence de l'angle du jet par rapport au débit de fuite (*Osterwalder & Wirth, 1985, Ferrante et al., 2012b*).

1.3. IMPACT DU MILIEU ENVIRONNANT

Pour les fuites classées comme orifice on peut suivre l'application du théorème de Torricelli, qui fournit un modèle de flux de fuite à travers un orifice idéalisé (c'est-à-dire une fuite dans l'air ou dans l'eau). Cependant, dans la pratique, les tuyaux des systèmes de distribution contenant des fuites et des éclatements sont enterrés et il est donc nécessaire de comprendre l'influence d'un milieu poreux externe sur l'hydraulique de la fuite. Traditionnellement, l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux est décrit analytiquement en utilisant la loi de Darcy qui implique que l'écoulement du flux diffère selon les propriétés du média dans lequel il évolue (Coetzer *et al.*, 2006).

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

- Q : débit volumique filtrant en m³/h
- K : la conductivité hydraulique du milieu poreux en m/s
- A : la surface de section étudiée
- $\frac{\Delta H}{L}$: le gradient hydraulique avec ΔH la différence des hauteurs piézométriques et L la longueur de l'échantillon

Cette équation, couplée avec l'équation de l'orifice, permet d'établir une équation théorique déterminant les pertes de charges dominantes entre celles exercées par l'orifice et celles exercées par la matrice du sol.

$$OS = \frac{K \cdot A \cdot Q}{2gL} \cdot \left(\frac{1}{C_d \cdot A_0} \right)^2 = \frac{h_o}{h_s}$$

- OS : Orifice Soil number
- h_o : perte de charge de l'orifice
- h_s : perte de charge du sol

La valeur OS indique une valeur de 1 pour une importance égale des pertes de charge entre le sol et l'orifice ; une valeur inférieure à 0,1 indique que les pertes de charge du sol sont dominantes et une valeur supérieure à 10 indique que les pertes de charge provenant de l'orifice sont dominantes (Walsky *et al.*, 2006). Pour des valeurs élevées d'OS et des orifices de type circulaire, l'équation de l'orifice est appropriée au calcul de débit. En revanche, il a été montré que l'on s'écarte de la relation en racine carré de la pression pour de faibles valeurs d'OS (inférieures à 1).

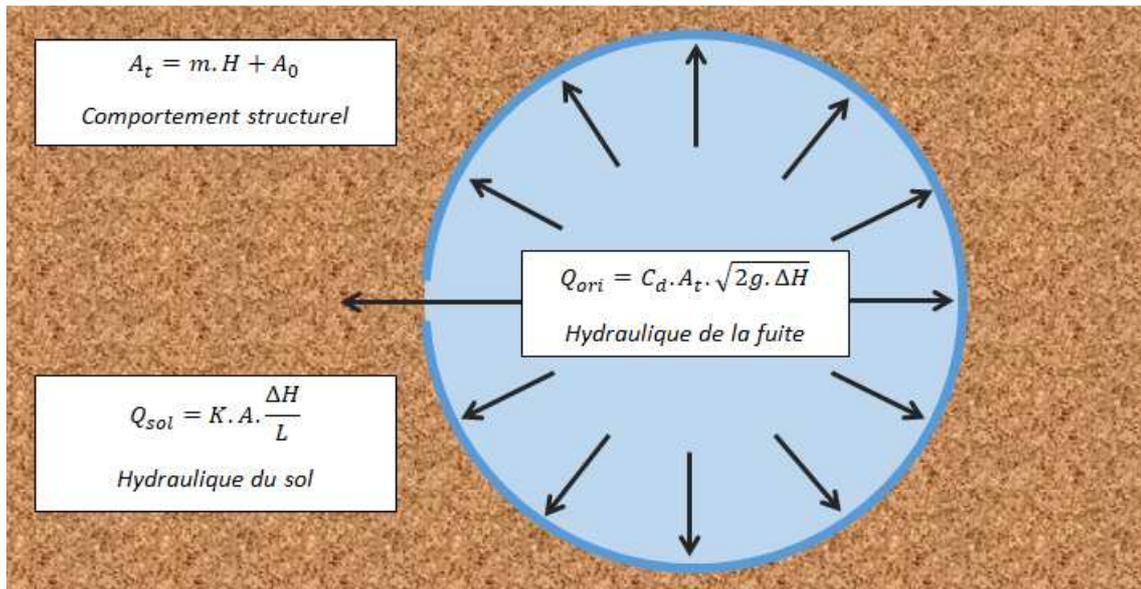


FIGURE 4 : SCHEMA RELIANT L'HYDRAULIQUE DES FUITES, DU COMPORTEMENT STRUCTUREL ET DE L'HYDRAULIQUE DES SOLS

Un phénomène de fluidisation peut s'établir lorsque les forces inter particulaires à l'intérieur d'un matériau granulaire sont négligeables et permettent aux particules de se déplacer librement. Cela modifie les caractéristiques du flux s'écoulant à travers le media poreux et limite considérablement les pertes de charge exercées par le sol sur la fuite. Dans les conditions d'une fluidisation, il a été observé que la courbe de pression-débit de fuite se rapprochait de la réaction en racine carré définie par l'équation de l'orifice (*Van Zyl et al., 2013*).

III. LA FUITE A L'ECHELLE DU PILOTE

Les manipulations réalisées à cette échelle simulent de manière précise les conditions de fuite d'un réseau hydraulique, avec un contrôle rigoureux de chaque paramètre. De plus, grâce à la modularité de ces paramètres, les expériences menées permettent une étude reflétant un ensemble complet des situations de fuite présentes sur le réseau AEP.

Après une introduction sur le fonctionnement du pilote et des paramètres mesurés, les gammes de tuyaux et les types de sol utilisés seront présentés. Le protocole expérimental sera ensuite décrit pour laisser place à la présentation des résultats obtenus sur la période 2019-2021.

1. BOUCLE HYDRAULIQUE & CAISSONS

Le pilote mesure, via une circulation en continu d'un volume d'eau à travers un circuit fermé, la fuite d'un tronçon défini suivant des critères précis dans les conditions réelles d'un réseau hydraulique. Le pilote se compose en trois parties distinctes : la partie hydraulique regroupant les composants de la boucle principale (tronçons, vannes, raccords, pompes, etc.), la partie 'caisson sol' (CS) contenant un échantillon de canalisation placé dans un sol compacté, et le 'caisson eau' (CE) contenant un échantillon de canalisation dans un volume d'eau.

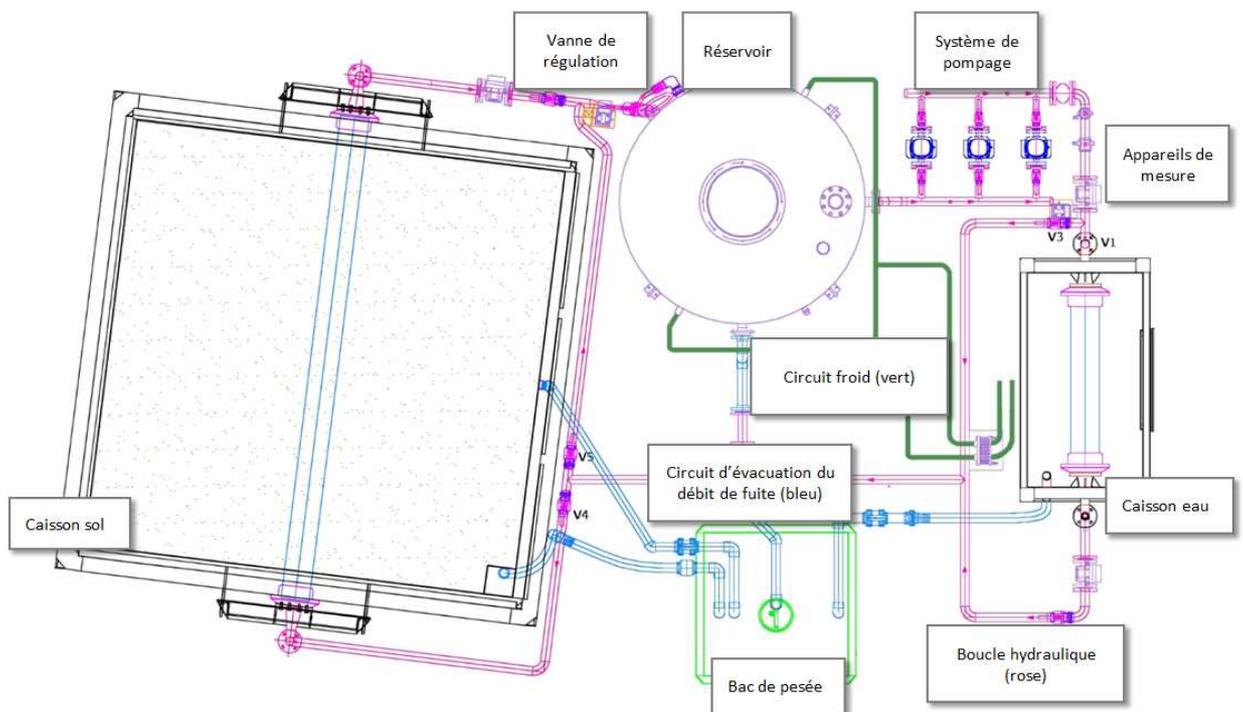


FIGURE 5 : SYNOPTIQUE DU PILOTE

Les caissons sont tous les deux dépendants du bac de pesée et ne peuvent pas fonctionner de manière simultanée. Le jeu de vannes présent sur la boucle hydraulique oriente le flux pour un fonctionnement avec le CS ou avec le CE.

1.1. CAISSON SOL - CS

Le caisson sol est un caisson d'acier créé sur mesure de dimension 3m*3m*2.25m. Deux de ses côtés sont percés d'un orifice pour l'insertion d'un échantillon de tuyau étudié, de taille variable (DN50 à DN200).

Un caniveau est installé en-dessous du caisson, perpendiculairement à l'axe du tuyau permettant de recueillir et d'évacuer les eaux de fuite vers le bac de pesée.

Pour chaque manipulation, une membrane en géotextile est installée entre la paroi du caisson et le sol compacté. En effet, les fines pourraient à long terme endommager les pompes et vannes du pilote si elles venaient à s'y accumuler.

Des capteurs de température thermocouples (au nombre de 12) installés dans le sol compacté ont pour fonction de déterminer l'avancée de l'eau de fuite dans le massif. Une variation de température brusque induira la présence de la nappe d'eau au point de position de la sonde concernée.

1.2. CAISSON EAU - CE

Le caisson eau est un caisson en INOX sur mesure de dimension 1.5m*0.8m*0.8m.

Une paroi est équipée d'une vitre en plexiglas pour visualiser et filmer l'expérience. Un spot d'éclairage est aussi présent pour une meilleure visibilité de la fuite lors des captures vidéo.

Enfin, un déversoir est situé en haut du caisson pour évacuer le surplus d'eau (équivalent du débit de fuite) du caisson.

2. PARAMETRES MESURES

Parmi tous les paramètres mesurés sur le pilote, on distingue deux catégories :

- Les paramètres dits 'fixes', paramètres intrinsèques au pilote qui sont réglés par l'utilisateur et ne varient pas de manière significative pendant l'expérience ;
- Les paramètres dits 'variables', qui sont les paramètres observés en sortie par l'utilisateur et dont la variation n'est pas contrôlée ;

1.1. PARAMETRES FIXES

PRESSION

La pression dans la boucle est réglée à l'aide d'une vanne de régulation pneumatique pilotée via le système de télégestion. La vanne associée à la puissance fournie par la station de pompage

(composée de trois pompes indépendantes) assure le recouvrement d'une gamme de pression allant de 0 à 14 bars (le système étant dimensionné pour fonctionner à 16 bars maximum).

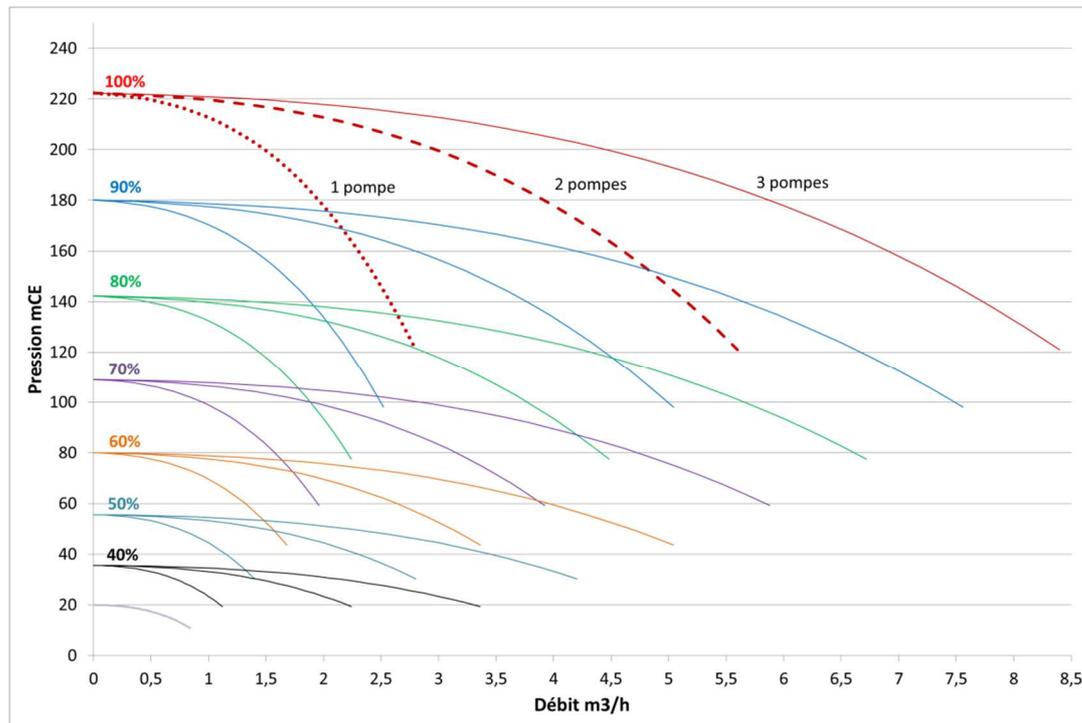


FIGURE 6 : COURBE CARACTERISTIQUE DU SYSTEME DE POMPAGE ASSOCIEE AU PILOTE

Afin de se rapprocher le plus fidèlement possible des scénarios rencontrés sur les réseaux et par souci de temps, les expériences sont rarement menées à une pression supérieure à 12 bars.

La pression de la boucle est mesurée à l'aide d'un capteur de pression situé en sortie du système de pompage.

DEBIT

La gestion du débit s'effectue avec le système de pompage et la vanne de régulation. La plage de débit recouvre une gamme allant de 0 à 8 m³/h (pour une pression inférieure ou égale à 12 bars), offrant la possibilité de mener des manipulations en régime laminaire et en régime turbulent.

Les mesures de débit sont réalisées par trois débitmètres électromagnétiques : une mesure en sortie du système de pompage, indiquant le débit entrant dans le CS ou CE, et une mesure de débit en sortie de chaque caisson.

TEMPERATURE DE L'EAU

Le système est conçu pour faire circuler un flux continu à une température T constante, pouvant être fixée entre 5°C et 35°C. Cette régulation de température s'opère de deux façons différentes, suivant si la température désirée est inférieure ou supérieure à la température ambiante.

| État T | Demande | Opération |
|---------------------------------------|---------|--------------------------------------|
| $T_{\text{désirée}} > T_{\text{amb}}$ | Chaud | Mise en marche de la résistance |
| $T_{\text{désirée}} < T_{\text{amb}}$ | Froid | Mise en circulation du circuit froid |

TABLEAU 2 : REGULATION EN TEMPERATURE DU CIRCUIT HYDRAULIQUE

Une résistance présente dans le réservoir permet l'apport en calories nécessaires au réchauffement du volume d'eau présent dans la cuve et à l'ensemble de la boucle. En complément, un circuit de refroidissement connecté à un échangeur externe traverse le réservoir pour prendre le nombre de calories nécessaires au refroidissement du volume d'eau du pilote.

La mesure de température est réalisée en sortie du système de pompage par un capteur de température de type PT100.

COMPACTAGE DU SOL

Cette donnée est propre au CS. L'installation du sol dans le caisson se fait par superposition successives de couches de sol compacté (type GNT de classe D2) avec pose d'un lit de sable au niveau du tuyau.

Contraint par le temps, les manipulations menées sur CS ont dû être limitées à un seul type de sol. En revanche, la présence d'une nappe phréatique de niveau réglable peut être simulée à l'intérieur du caisson afin d'étudier l'influence du niveau de nappe sur le comportement de la fuite.

1.2. PARAMETRES VARIABLES

DEBIT DE FUITE

Cette valeur est mesurée de deux manières différentes :

- Par différence entre les mesures de débitmètres de sortie de pompe et de sortie de caisson : ce calcul donne une valeur informative et n'est pas utilisé dans l'exploitation des données, car la marge d'erreur de la mesure est trop importante pour la précision recherchée ;
- Par pesage de l'eau de débit de fuite récupérée dans le bac de pesée : c'est cette donnée qui sera conservée pour le calcul ;

L'usage d'une balance de précision placée sous le bac de pesée permet de suivre de manière ultra-précise l'évolution du débit de fuite. Elle est connectée au système de télégestion.

A partir des données de pesée, la donnée est calculée par moyenne glissante sur une durée déterminée :

$$Q_f = \frac{P_{t_n} - P_{t_1}}{t_n - t_1}$$

- Q_f : débit de fuite en kg/min, converti en L/min pour l'eau
- P_{t_n} : poids du contenant de la balance à l'instant n en kg
- t_n : temps à l'instant n en min

Les valeurs de pesée sont enregistrées à un pas de temps d'une valeur par minute. Pour chaque expérience, la durée choisie pour le calcul est de 10 min.

Après importation des valeurs du système de télégestion sur tableur Excel, les données sont traitées sur le logiciel d'analyse statistique R. Les valeurs de débit de fuite sont donc triées, épurées, éliminant ainsi les fluctuations transitoires de façon à conserver uniquement les valeurs de régime permanent.

DEFORMATION

La valeur mesurée est la déformation du tuyau autour de la fuite. Elle dépend des paramètres appliqués au pilote (pression, température, etc.), mais aussi de la nature du matériau du tuyau.

Les jauges de contrainte, appliquée autour de la fuite, permettent le calcul de cette valeur. Elles fonctionnent sur le principe d'une résistance classique : lorsque le tuyau se déforme, la résistance se déforme elle aussi et sa valeur est modifiée. De là, la valeur de déformation, exprimée en $\mu\text{m}/\text{m}$, est déduite.

$$\sigma = f(\Omega)$$

- σ : déformation mesurée en $\mu\text{m}/\text{m}$
- Ω : résistance en ohm

De même que pour les valeurs de débit de fuite, les valeurs de déformation sont traitées sous R pour ne conserver que les données exploitables.

TRAITEMENT D'IMAGE

La prise d'image de la fuite concerne seulement les manipulations menées sur le CE. Une caméra de précision est placée sur trépied devant la vitre du CE et filme en continue l'évolution de l'aire de l'orifice de fuite. Les images enregistrées sont ensuite traitées avec le logiciel ImageJ pour le calcul d'aire.

L'objectif de la prise d'image est d'établir une corrélation entre la surface filmée de la fuite, la déformation mesurée par les jauges, et le débit de fuite.

3. LES GAMMES DE TUYAU

En plus des paramètres intrinsèques au pilote énoncés précédemment, le nombre de manipulations se voit élargi de par la diversité des paramètres caractéristiques des tuyaux mis à l'essai. Les gammes utilisées sont ici détaillées pour les matériaux, les DN, ainsi que les diamètres de fuite.

1.1. MATERIAUX

Trois matériaux différents sont utilisés : le PVC, le PEHD, et la Fonte ductile, dérivé de la Fonte grise par ajout d'une faible dose de magnésium. Ils représentent à eux trois plus des $\frac{3}{4}$ du linéaire du réseau français de distribution d'eau potable hors branchement (Husson et al., 2020).

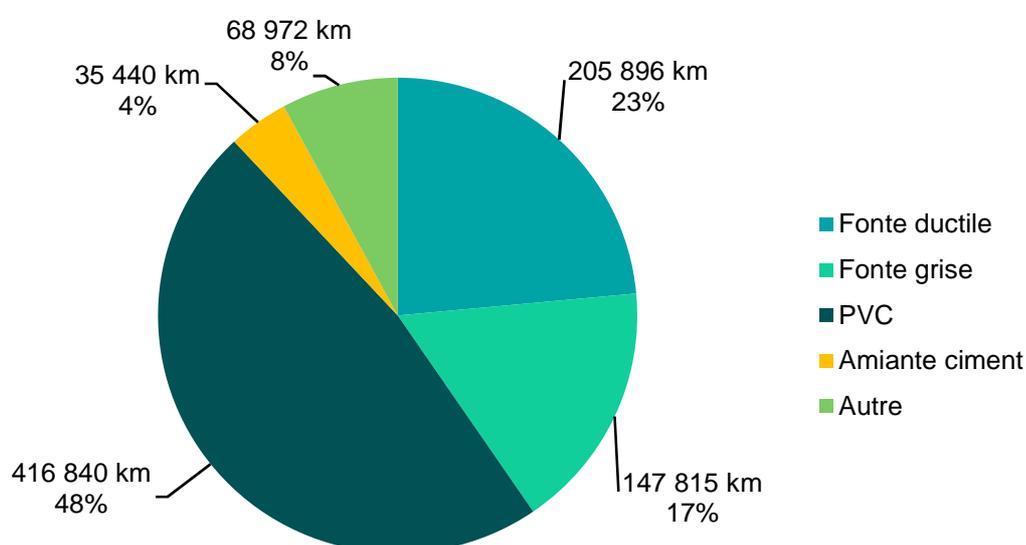


FIGURE 7 : REPARTITION DES MATERIAUX SUR LE LINEAIRE TOTAL (HUSSON ET AL., 2020)

Pour l'étude, les caractéristiques exploitées du matériau sont sa viscoélasticité, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sous une contrainte mécanique, et son coefficient de dilatation, qui indique sa capacité à se dilater ou se rétracter sous l'effet de la température.

| Matériau | Masse volumique [kg/m ³] | Module de Young E [Gpa] | Coefficient de dilatation thermique α [K ⁻¹] |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|
| Fonte grise (95% Fe + 5% C) | 7100 à 7300 | 80 à 130 | 9.10-6 |
| PVC | 1350 | 0,35 à 2,5 | 78.10-6 |
| PE | 930 | 0,2 | 2.10-4 |

TABLEAU 3 : ORDRE DE GRANDEUR DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX

Du point de vue du réseau, chaque matériau possède ses avantages et inconvénients. La Fonte offre une grande résistance et durabilité, tandis que le PVC et PEHD, moins onéreux, permettent une meilleure flexibilité et adaptabilité sur terrain.

1.2. DIAMETRE NOMINAL

Les DN utilisés varient du DN50 au DN200. Cette large gamme permet une étude représentative du réseau en recouvrant plus des 2/3 des DN totaux.

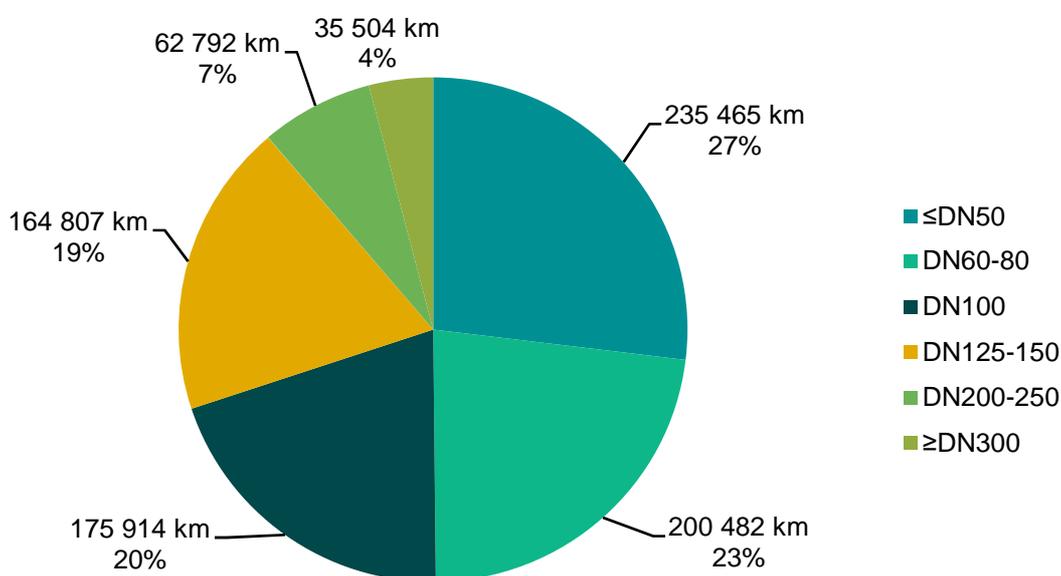


FIGURE 8 : REPARTITION DES DN SUR LE LINEAIRE TOTAL

Les DN sont liés directement à l'épaisseur du tuyau, donc en partie à sa résistance et sa capacité à se déformer plus ou moins facilement. Pour une même PN, l'épaisseur du tuyau augmente avec son DN. Pour nos manipulations, les tuyaux possèdent tous, à quelques exceptions près, une PN16.

1.3. DIAMETRE DES FUITES

Pour rester dans les conditions expérimentales d'un phénomène de fuite diffuse, la gamme de diamètre d'orifice est partagée entre des diamètres de 2 mm et 4mm.

Les deux diamètres sont utilisés pour les manipulations sur CE. Cependant, les manipulations sur CS se limitent pour la plupart à l'utilisation du seul diamètre 4mm. En effet, avec un diamètre de 2mm,

les colmatages de l'orifice sont beaucoup plus fréquents : il convient alors de dégager le point de fuite en creusant du haut du caisson jusqu'au tuyau pour déboucher l'orifice à la main, entraînant un changement des caractéristiques du sol et nuisant au bon déroulement de l'expérience.

4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

1.1. PREPARATION DU TUYAU

Avant la mise au banc pour l'essai, le tuyau testé requiert une préparation spécifique, notamment pour l'installation des jauges de contrainte. Après mesure et découpe du tuyau, le point de fuite est percé par un foret calibré perpendiculairement à l'axe de l'échantillon. Les jauges sont ensuite installées autour du point de fuite selon le protocole décrit ci-dessous.

| Étape | Descriptif |
|-------|--|
| 1 | Nettoyage des instruments de collage à l'aide d'une solution dégraissante RMS |
| 2 | Nettoyage du tuyau au RMS |
| 3 | Abrasion des points de collages pour faciliter l'adhérence des jauges - nettoyage au RMS |
| 4 | Application de la colle cyanoacrylate Z70 au point de collage |
| 5 | Dépôt de la jauge sur le point de collage |
| 6 | Pressage de la jauge pour une durée de 2 min |
| 7 | Vérification du bon collage de la jauge |
| 8 | Application d'une première couche imperméable de pâte (AK22) |
| 9 | Application d'une deuxième couche imperméable de pâte (ABM75) |
| 10 | Étiquetage de chaque jauge |

TABEAU 4 : PROTOCOLE DE COLLAGE DES JAUGES DE DEFORMATION

Il a été établi après les pré-essais que le nombre total de jauges nécessaires à une mesure optimale de la déformation serait de 6.

Quatre jauges sont positionnées autour du point de fuite : deux en position horizontale, permettant la mesure de déformation axiale et deux en position verticale permettant la mesure transversale.

Deux jauges sont placées excentrées du point de fuite, l'une dans la direction axiale, l'autre transversale. Ces deux jauges font office de jauges de référence : elles mesurent uniquement la déformation du tuyau due aux variations de pression et de température, et non la déformation due à

l'écoulement du débit au point de fuite. Ainsi, ces deux jauges permettent de vérifier en permanence la validité des mesures de déformation faites au niveau de la fuite et d'apporter si nécessaire des corrections par comparaison entre les jauges de référence et les jauges de mesure.

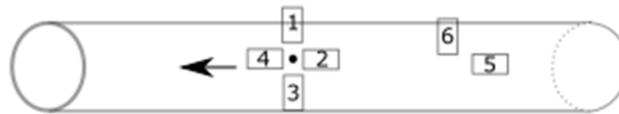


FIGURE 9 : SCHEMA DE POSITIONNEMENT DES JAUGES VIS-A-VIS DE L'ORIFICE DE FUITE

Les jauges de contrainte sont des instruments de mesure sensibles, qui peuvent se dérégler très facilement si le collage n'a pas été effectué méticuleusement. C'est pourquoi il est primordial de respecter le protocole étape par étape pour des mesures optimales.



FIGURE 10 : JAUGES DE CONTRAINTE AVANT (A GAUCHE) ET APRES (A DROITE) IMPERMEABILISATION

De plus, il est à noter que pour un collage optimal, la colle doit être conservée dans un environnement à température constante et basse de préférence (réfrigérateur). Lors du collage, le matériau sur lequel vont être placées les jauges doit se situer à température moyenne, idéalement entre 15 et 20°C.

1.2. MISE EN PLACE DU PILOTE

Le protocole suivant décrit la mise en service des caissons et le déroulement d'une expérience classique de mesure de fuite.

PROTOCOLE DE PREPARATION

| Étape | Descriptif | |
|-------|---|------------------------------------|
| | <i>Caisson Eau</i> | <i>Caisson Sol</i> |
| 1 | Vidange des cuves (réservoir et cuve de pesée) et de la boucle principale | |
| 2 | a | Sortie du caisson en extérieur |
| | b | Vidange du caisson par aspiratrice |

| | | |
|---|---|---|
| c | Installation du tuyau | Installation du géotextile |
| d | Vérification de l'étanchéité | Installation du tuyau et des joints d'étanchéité |
| e | Ouverture et fermeture des vannes nécessaires au fonctionnement en CE | Remplissage couche par couche de sol compacté du caisson et du lit de sable |
| f | Remplissage du caisson (eau de ville) | Installation pour chaque couche des capteurs de température |
| g | | Entrée du caisson en intérieur |
| h | | Ouverture et fermeture des vannes nécessaire au fonctionnement en caisson sol |
| 3 | Remplissage du circuit d'eau (eau de ville) | |
| 4 | Vidange d'air du circuit et des pompes | |
| 5 | Branchement des jauges et/ou capteurs de température sur boîtier | |

TABEAU 5 : PROTOCOLE DE MISE EN ROUTE DES EXPERIENCES SUR PILOTE

La mise en place du CS est plus lourde à effectuer d'un point de vue logistique et financier. En effet, elle requiert l'intervention d'une entreprise tierce, pour sortir le caisson du hall technique, dont la masse globale atteint environ 50T, le vider, puis le remplir. Cette manipulation nécessite la venue de main d'œuvre supplémentaire et d'engin de chantier spécifique (aspiratrice).



FIGURE 11 : VIDANGE DU CAISSON PAR ASPIRATION

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

| Étape | Descriptif |
|-------|--|
| 1 | Mise à zéro des jauges de contraintes |
| 2 | Démarrage des pompes pour une pression $P_0 = 0,5$ bar |
| 3 | Atteinte du régime permanent - Stabilisation des valeurs de débit et déformation |
| 4 | Après un temps t , changement du palier de pression |
| 5 | Répétition des étapes 3 & 4 pour : - $P_1 = 1$ bar - $P_4 = 6$ bars - $P_7 = 8$ bars - $P_2 = 2$ bars - $P_5 = 8$ bars - $P_8 = 4$ bars - $P_3 = 4$ bars - $P_6 = 10$ bars - $P_9 = 1$ bars |

TABLEAU 6 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL DES CS & CE

Le temps de stabilisation t énoncé à l'étape 4 (cf. tableau 6) change selon les paramètres de l'expérience. C'est le facteur dimensionnant le temps d'expérience global. Il varie de quelques heures, à quelques semaines pour les manipulations les plus longues. Afin d'accélérer l'expérience, certains paliers de pression peuvent ne pas être faits.

L'étape 5 se déroule en deux phases : une 1^{ère} phase de montée en pression, où la pression appliquée au tuyau augmente palier par palier jusqu'à un palier de 10 bars, et une 2^{ème} phase de descente en pression, où la pression redescend jusqu'à une pression relative nulle. La comparaison des données de mesure (débit de fuite et déformation) obtenues lors de la 1^{ère} et 2^{ème} phase permet la mise en évidence du caractère viscoélastique du matériau à l'étude.

5. EXPLOITATION DES RESULTATS

Depuis le lancement du pilote en juin 2019, un total d'environ 50 expériences ont été menées sur les deux types de caisson. Les résultats présentés sont une synthèse des données récupérées. Ils appuient la validation ou non des principales hypothèses mettant en avant l'influence des différents paramètres sur le comportement hydraulique de la fuite, à savoir :

- L'influence de la pression
- L'influence du matériau et de sa géométrie
- L'influence du diamètre de fuite
- L'influence du débit dans la boucle hydraulique
- L'influence de la température
- L'influence du milieu environnant

Les paramètres les plus pertinents à tester ont été ciblés au démarrage afin d'établir un plan d'expérience optimisé. Il est à noter que les gammes de DN retenues concernent les DN60 (Fonte) et 63 (PVC & PEHD) ainsi que les DN100 (Fonte) et DN125 (PVC & PEHD), étant les gammes les plus couramment présentes sur réseau de distribution AEP.

| | |
|------------------|-----------|
| Pression (bar) | 0,5 à 10 |
| Matériaux | Fonte |
| | PVC |
| | PEHD |
| DN (mm) | 60 - 63 |
| | 100 - 125 |
| Ø Fuite (mm) | 2 |
| | 4 |
| Température (°C) | 10 |
| | 20 |
| | 30 |

TABEAU 7 : ENSEMBLE DES PARAMETRES EXPERIMENTAUX

De plus, au vu du nombre important de paramètres à prendre en compte et afin d'alléger un plan d'expérience particulièrement lourd, il a été décidé de tester un unique type de sol (le plus répandu en voirie) pour les expériences menées sur CS.

1.1. DONNEES DE DEBIT DE FUITE

Les résultats des expériences réalisées avec le CE seront présentés, et seront suivis par une présentation des résultats des expériences menées sur le CS. Par souci de clarté et pour éviter les redondances par la suite, les expériences seront nommées suivant la dénomination ci-après, indiquant le milieu où se déroule l'expérience, le matériau ainsi que son numéro correspondant :

$$E/S \ 1/2/3 \ n$$

- E : expérience en CE, S : expérience en CS
- 1 : PVC, 2 : Fonte, 3 : PEHD
- n : n^{ième} expérience sur le milieu et matériau correspondant

Par exemple, l'expérience **E203** correspond à la 3^{ème} expérience sur la **Fonte** menée en **CE**. Afin d'éviter d'alourdir la lecture, les dénominations n'incluent pas les données de DN, ØFuite et température. Pour plus de précision, le tableau récapitulatif des expériences réalisées est consultable aux annexes n°4 et 5.

CAISSON EAU : VALIDATION DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES

L'influence des différents paramètres détaillés dans le tableau 7 a d'abord été vérifiée sur le CE, au vu de la plus grande facilité de mise en place des expériences par rapport au CS. Les résultats qui suivent regroupent les données de la globalité des expériences menées.

Les graphiques qui suivent représentent l'évolution du débit de fuite dans l'eau en fonction de la pression pour chacun des matériaux et des deux diamètres de fuite. Les courbes théoriques de l'équation de l'orifice (Torricelli) sont ajoutées pour comparaison. Elles sont tracées avec les coefficients de décharge minimum et maximum (voir Tableau 1).

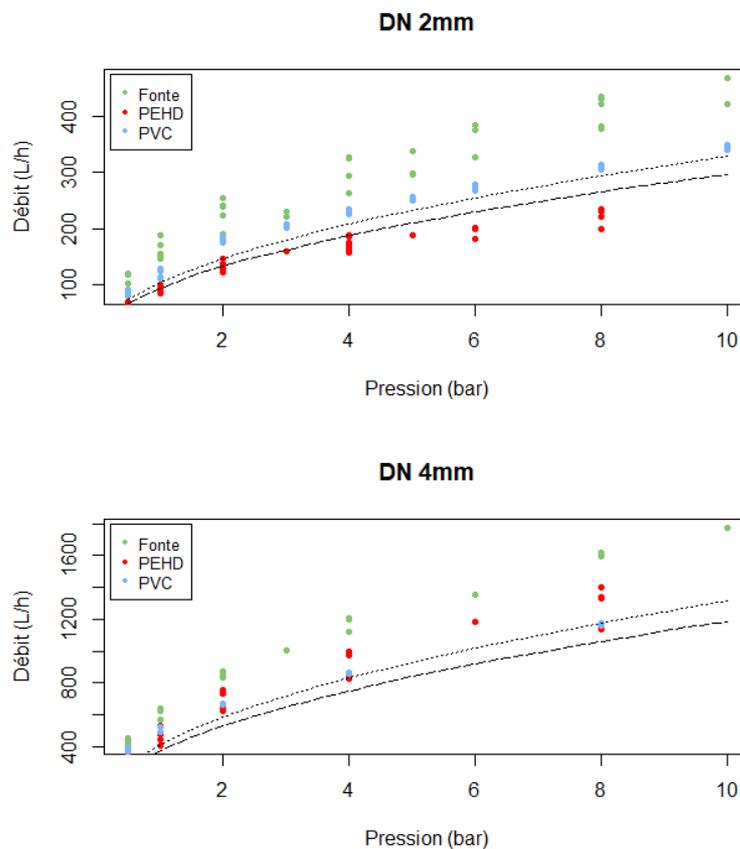


FIGURE 12 : INFLUENCE DES MATERIAUX ET DU DIAMETRE DE L'ORIFICE SUR LE DEBIT DE FUITE

On constate les points suivants :

- Une influence de la pression : pour chaque expérience menée, le débit croît en fonction de la pression, sur une loi en allure de racine
- Une influence du matériau : le débit de fuite diffère selon le matériau testé, avec notamment un débit de fuite observé plus élevé pour la Fonte
- Une influence du diamètre de fuite : pour une pression moyenne de 4 bars, le débit de fuite moyen est 3.76 fois plus élevé pour un diamètre de fuite de 4mm que de 2mm

- Les valeurs expérimentales diffèrent des valeurs de courbes théoriques bien que l'allure de la courbe reste similaire

Pour chaque échantillon de tuyau mis sur le banc d'essais, les expériences sont réalisées pour trois températures différentes. Les graphiques suivant représentent l'évolution du débit de fuite dans l'eau en fonction de la pression et du diamètre de fuite pour chacune des températures, par matériau.

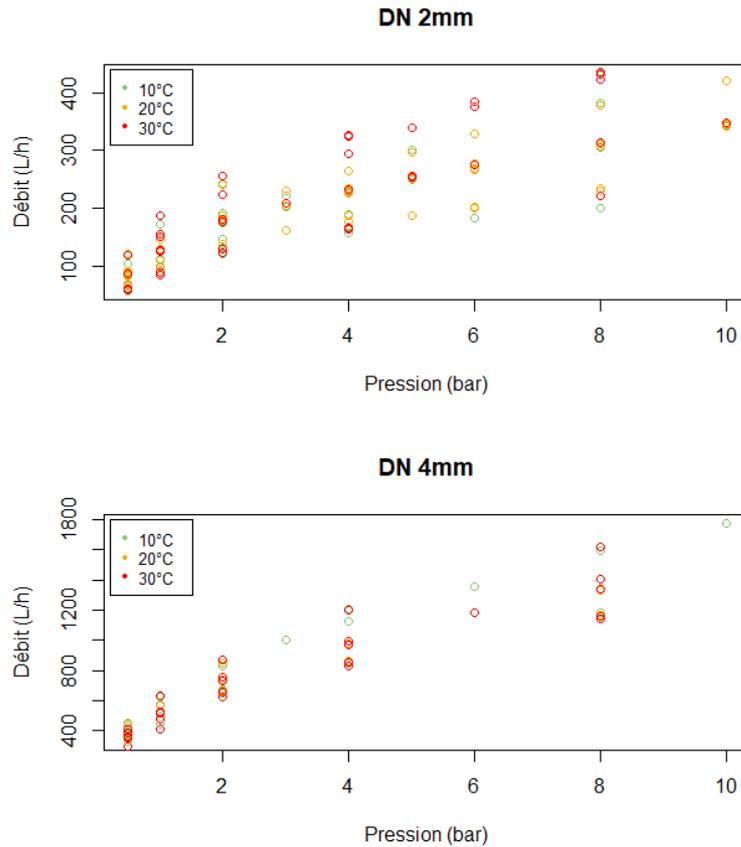


FIGURE 13 : DEBIT DE FUITE EN FONCTION DE LA PRESSION SUIVANT LES TROIS TEMPERATURES

On aperçoit par lecture graphique la difficulté à interpréter une influence de la température, entre autre à cause de la présence de plusieurs autres paramètres influant sur le débit. Un protocole supplémentaire est établi pour étudier l'influence de la température sur le débit de fuite, avec la température comme seul paramètre variable : dans le CE, on fixe une pression et un débit constants dans la boucle hydraulique, en faisant varier la température sur des paliers de 10 à 30°C. Les données suivantes sont observées : =CNUM(SUBSTITUE(SUBSTITUE(P3;"-";"/");".000000";""))

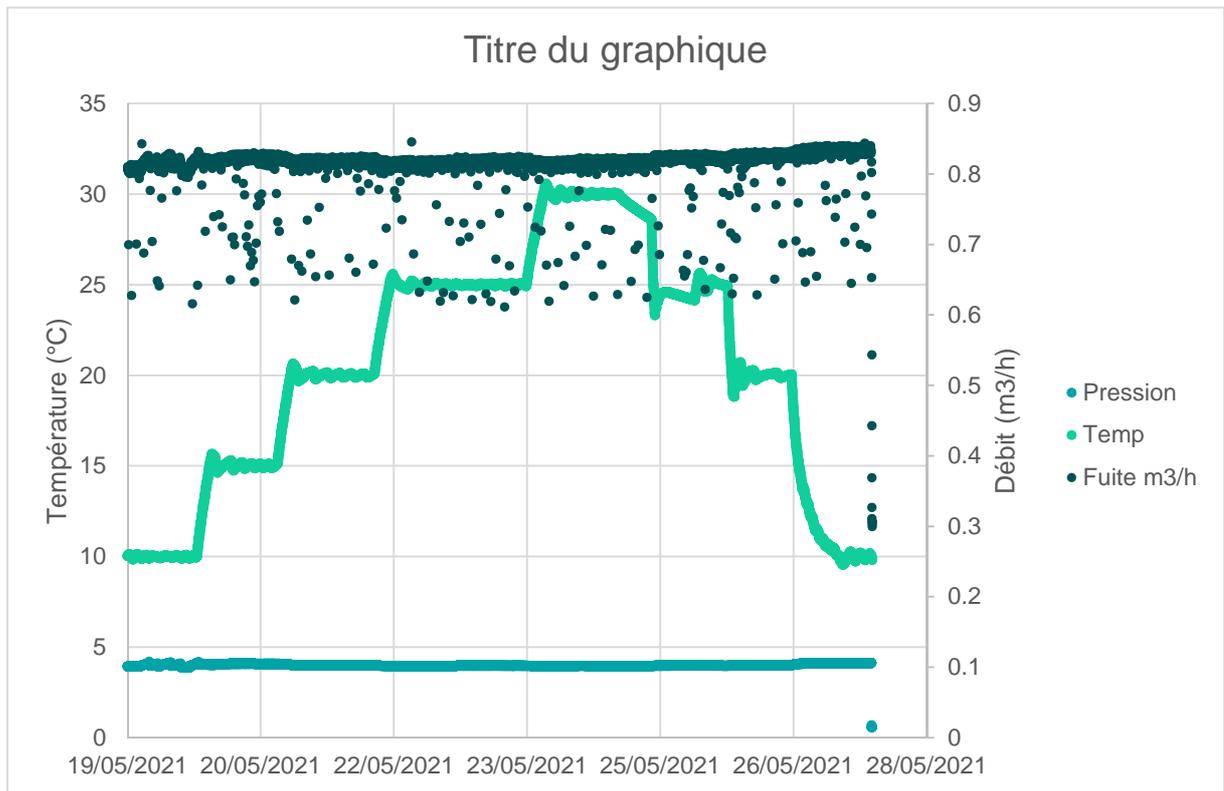


FIGURE 14 : DEBIT DE FUITE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR LE MATERIAU PEHD

L'expérience a été réalisée à une pression constante de 4 bars pour chacun des matériaux. On constate que la variation de la température n'a pas d'impact significatif direct sur le débit. En revanche, on peut observer que la régulation de pression n'est pas parfaitement régulière : pour une pression moyenne à 4,01 bars, on enregistre des variations allant de 3,89 à 4,20 bars. Ce phénomène est dû à la fluctuation de la viscosité de l'eau en fonction de la température. Lorsque la viscosité change, la pression dans la boucle est modifiée et la vanne de régulation réagit, entraînant inévitablement une légère variation du débit.

D'après les expériences menées sur le CE et les résultats des données de débit observés, les hypothèses suivantes sont énoncées et seront utilisées pour l'établissement du modèle numérique :

- La pression, la taille de l'orifice de fuite et le type de matériau ont une influence sur le comportement du débit de fuite
- La température n'a en revanche pas d'influence
- Les débits expérimentaux suivent l'allure des lois d'équation théoriques avec une courbe en racine, mais les ordres de grandeurs diffèrent légèrement

CAISSON SOL : INFLUENCE DU MILIEU POREUX

Les expériences menées sur le CE ont été répliquées sur le CS. L'objectif est de comparer les données obtenues sur chacun des caissons et valider l'hypothèse d'une influence du sol sur le

comportement de la fuite. Les graphiques regroupent les données des expériences réalisées sur chacun des matériaux. Pour s'assurer d'un environnement identique à toutes les expériences, des contrôles de compactage sont réalisés en différents points du caisson à chaque manipulation : deux mesures sont effectuées au niveau des coins du caisson, une à côté du tuyau en face de la fuite, et une à côté du tuyau, à l'opposé de la fuite. Les mesures de compactage sont consultables à l'annexe n°7. Dans le caisson sol, la fuite est orientée à 45° vers le haut.

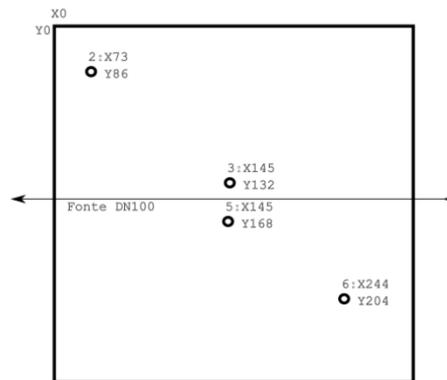


FIGURE 15 : SCHEMA DE LA REPARTITION DES POINTS DE MESURE DE COMPACTAGE SUR LE CS – COORDONNEES EN CM

Les essais de compactage exposés ci-dessus montrent trois profils de sol retrouvés dans le caisson :

- Deux profils (n°2&6) correspondent aux deux mesures de coin, éloignées de l'orifice de fuite. Le type de GNT est le même sur toute la profondeur (D2i/Q3) et le compactage est régulier
- Le profil n°3 correspond à la mesure devant la fuite. La mesure a été réalisée après l'expérience. Le sol a été déstabilisé et a subi des modifications de structure dues à l'écoulement de la fuite, d'où une résistance de pointe plus faible sur la partie de sol environnante.
- Le profil n°5 correspond à la mesure à l'opposé de l'orifice de fuite. On aperçoit les deux types de GNT, D2i/Q3 et B1i/Q4, ce dernier correspondant au lit de sable englobant le tuyau.

Les résultats des expériences effectuées sur le CS sont regroupées ci-dessous.

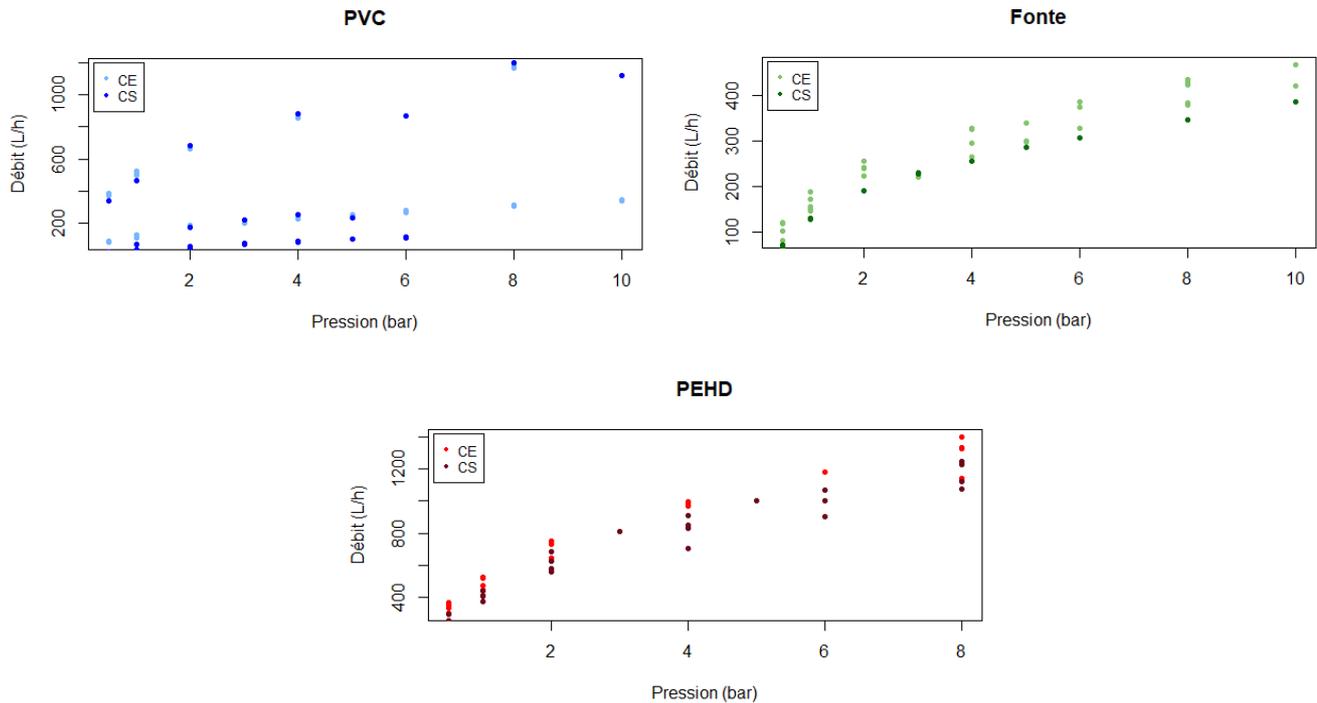


FIGURE 16 : ENSEMBLE DES EXPERIENCES MENEES SUR CS COMPAREES AU CE

On observe que globalement, les valeurs observées sur le CS sont inférieures aux valeurs observées en CE, confirmant la présence d'un effet de sol sur le débit de fuite.

De manière plus précise, on distingue trois scénarios :

- Un colmatage total : l'orifice de fuite est totalement obstrué et le débit de fuite est inexistant. Ce scénario est plus probable pour les cas de faible diamètre d'orifice de fuite (en l'occurrence les diamètres de fuite de 2mm ont apporté des problèmes de colmatage récurrents). Il a par la suite été choisi de réaliser des manipulations en CS uniquement avec un diamètre d'orifice de 4mm pour éviter ce phénomène.
- Un colmatage partiel : le débit de fuite circule dans la matrice du sol, mais les fines présentes dans celle-ci s'agglomèrent sur les chemins préférentiels de fuite, comblant la porosité augmentant la perte de charge et la chute de débit de fuite
- Une fluidisation du milieu : les fines ont été chassées et le débit de fuite circulant dans la matrice ne subit aucune résistance du sol

Ces différents cas mettent en évidence la nature instable du sol face aux contraintes de pression appliquées par la fuite. Les expériences étant réalisées sur des échelles de temps relativement courtes (quelques jours à quelques semaines) par rapport à des fuites existantes sur le terrain (quelques mois), il serait intéressant de se demander comment ces trois scénarios évolueraient sur un temps plus long.

1.2. ÉTABLISSEMENT DU MODELE NUMERIQUE

A partir des résultats du pilote et des équations théoriques, on cherche à créer et caler un modèle numérique permettant d'estimer le débit de fuite en fonction de notre liste de paramètres.

On a vu précédemment que la loi classique de l'orifice ne s'adaptait pas précisément aux résultats, du moins qu'il était nécessaire de distinguer plusieurs cas. Pour la création du modèle, les données ont été traitées et analysées sur le logiciel R (logiciel libre destiné aux statistiques et à la science des données) avec les hypothèses suivantes :

- L'influence de chacun des paramètres est calculée via R par traitement statistique afin d'estimer leur pertinence pour la création du modèle
- Au vu du caractère instable des données générées par le CS, seules les données observées sur le CE sont utilisées pour la création du modèle

VALIDITE DES PARAMETRES

La pertinence des paramètres est testée avec la fonction '**stepAIC**'. Cette fonction permet de sélectionner les variables pour un modèle optimisé. Elle réalise une sélection ascendante et/ou descendante en optimisant le critère AIC. Lors d'une sélection descendante, le retrait d'un paramètre entraînant une diminution significative du critère AIC indique la faible influence du paramètre en question.

L'utilisation de cette fonction confirme les hypothèses précédemment obtenues via les expériences en CE et CS. Après calcul, les paramètres déterminés comme ayant une incidence faible sur le débit de fuite sont :

- Le DN du tuyau
- La température de l'eau

Ceux déterminés comme ayant une influence forte sont :

- La pression, noté P
- La surface de l'orifice de fuite, notée A_{fuite}
- Le matériau, noté Mat

La base de modèle utilisé pour le calcul de la régression linéaire se présente donc sous la forme suivante :

$$Q = f(P, A_{fuite}, Mat)$$

CALAGE DU MODELE

Pour le calcul de notre régression linéaire, on considère que :

- L'aire de l'orifice est constante en fonction de la pression
- Un modèle différent doit être établi pour chaque matériau

La régression linéaire se fait donc suivant la formule :

$$\ln(V) \sim \ln P: \text{Mat} + \text{Mat}$$

On note ici que c'est la vitesse du flux d'eau sortant (en m³/h) qui est calculé en fonction de la pression et du matériau afin de s'affranchir de l'aire de la fuite.

$$V = Q/A_{\text{fuite}}$$

Après calcul, les observations montrent une erreur résiduelle assez faible (0,112 sur 193 degrés de liberté) et un R² de 0,951, une valeur relativement élevée pour des données expérimentales.

Le modèle nous donne des coefficients de régression α et β pour chaque matériau. On remarque que l'on retrouve une équation similaire à la loi théorique du calcul de débit de fuite.

$$\ln(V) = \alpha + \beta \ln P$$

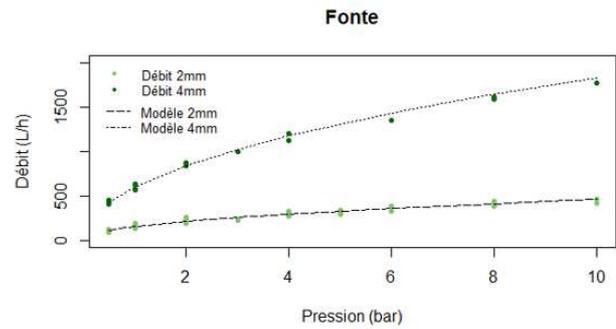
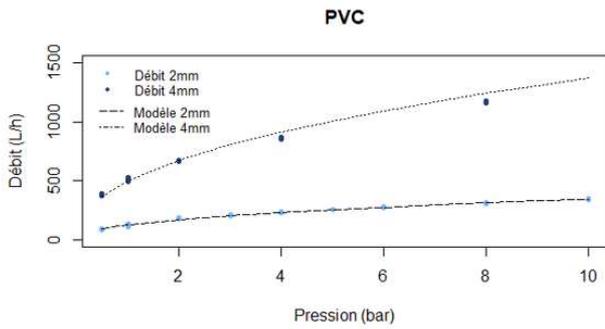
$$V = e^{\alpha} \cdot P^{\beta}$$

$$Q = e^{\alpha} \cdot A_{\text{fuite}} \cdot P^{\beta} \sim Q = A_{\text{fuite}} C_d \sqrt{2gH}$$

| Coefficient | Fonte | PVC | PEHD |
|-------------|---------|---------|---------|
| α | 16,5827 | 16,2091 | 16,4801 |
| β | 0,48091 | 0,44018 | 0,46702 |

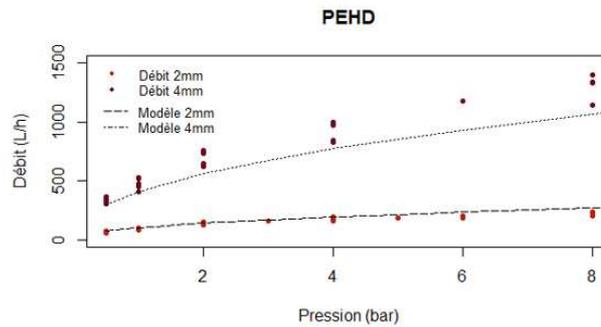
TABLEAU 8 : COEFFICIENT DE REGRESSION DU MODELE PAR MATERIAU

On retrouve des coefficients de pression proche de 0,5 avec un coefficient légèrement plus important pour la Fonte, suivi du PEHD puis du PVC. On compare pour la suite le modèle obtenu avec les résultats obtenus sur CE. Sur chaque graphique, les deux courbes modèles correspondent aux deux tailles d'orifice de fuite utilisées.



Residual standard error: **0.0417** on 71 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.9907, Adjusted R-squared: **0.9905**
 F-statistic: 7544 on 1 and 71 DF, p-value: < 2.2e-16

Residual standard error: **0.08999** on 60 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.9649, Adjusted R-squared: **0.9643**
 F-statistic: 1649 on 1 and 60 DF, p-value: < 2.2e-16



Residual standard error: **0.1709** on 62 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.8775, Adjusted R-squared: **0.8756**
 F-statistic: 444.3 on 1 and 62 DF, p-value: < 2.2e-16

FIGURE 17 : COMPARAISON DU MODELE ETABLI POUR CHAQUE MATERIAU AUX DONNEES DU CE

De manière général, le modèle généré se cale correctement avec un R^2 de 0.8756 pour le PEHD, de 0.9643 pour la Fonte et de 0.9905 pour le PVC. On observe un calage moins précis pour le PEHD, venant du fait de données plus dispersées par palier de pression. Cela se visualise facilement en regardant l'évolution de la vitesse de flux en sortie d'orifice par rapport à la pression :

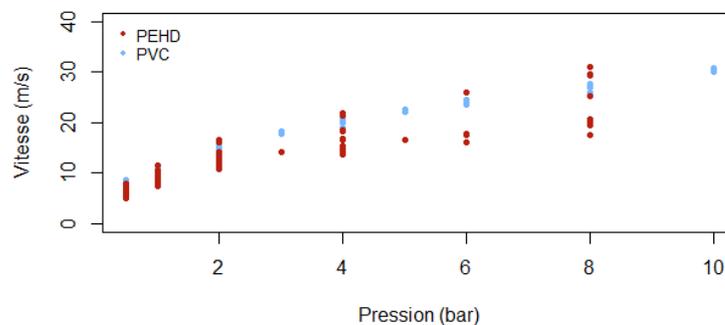


FIGURE 18 : COMPARAISON DE LA VITESSE DE FLUX ENTRE PVC ET PEHD

Tandis que les données PVC se rapprochent d'une courbe unique de vitesse, on observe que les données PEHD sont beaucoup plus étalées. Par conséquent le modèle établi ne peut être que moins précis. L'hypothèse de cet étalement serait que l'imprécision du perçage de l'orifice de fuite engendrerait de faibles écarts de diamètre d'orifice entre différents tuyaux testés, ce qui aurait une incidence sur le débit de fuite par la suite.

COMPARAISON AUX DONNEES EN CS

Pour estimer une influence potentielle du sol sur les débits de fuite, les données obtenues en CS sont comparées avec les courbes des modèles calés sur les données du CE.

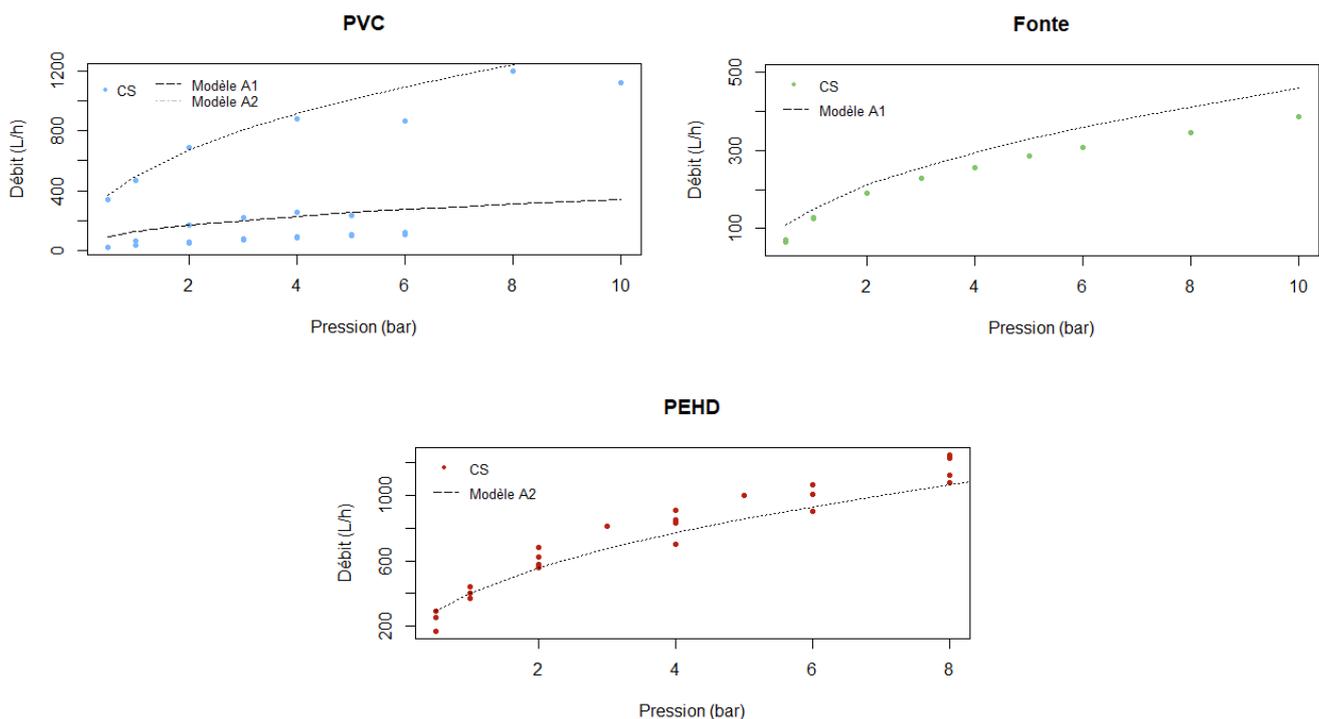


FIGURE 19 : COMPARAISON DU MODELE ETABLI AVEC LES DONNEES DU CS

On observe que :

- Pour le PVC, les courbes se situent au-dessus ou au même niveau que les données CS, traduisant respectivement un effet de sol et une fluidisation du media
- Pour la Fonte, la courbe de modèle (testée uniquement à 4mm en CS) se situe au-dessus des données CS, indiquant un effet de sol
- Pour le PEHD, les données CS sont réparties de part et d'autres du modèle (dû à une plus large dispersion des données comme vu précédemment)

On peut en déduire qu'il faudrait réussir à quantifier l'état du sol pour savoir dans quel scénario on se situe, et inclure cette donnée dans le modèle. Cela permettrait d'obtenir un modèle plus proche des résultats obtenus sur terrain.

1.3. DONNEES DE DEFORMATION

Les données de débit de fuite sont complétées avec les données de déformation obtenues par les jauges de contraintes placées sur le tuyau, de part et d'autre du point de fuite. Elles viennent confirmer ou infirmer les hypothèses exposées précédemment et mettre en évidence certaines caractéristiques plus difficilement observables par étude de débit, tel l'élasticité ou viscoélasticité du matériau. Alors que les études de débit nous donnent une vision du comportement du tuyau à l'échelle macroscopique, l'étude de déformation améliore la compréhension de ce comportement à l'échelle microscopique.

Pour une meilleure compréhension de l'exploitation des données de déformation, un graphique type est présenté et détaillé ci-après. Chacune des 6 jauges de contraintes est dénommée CHi.

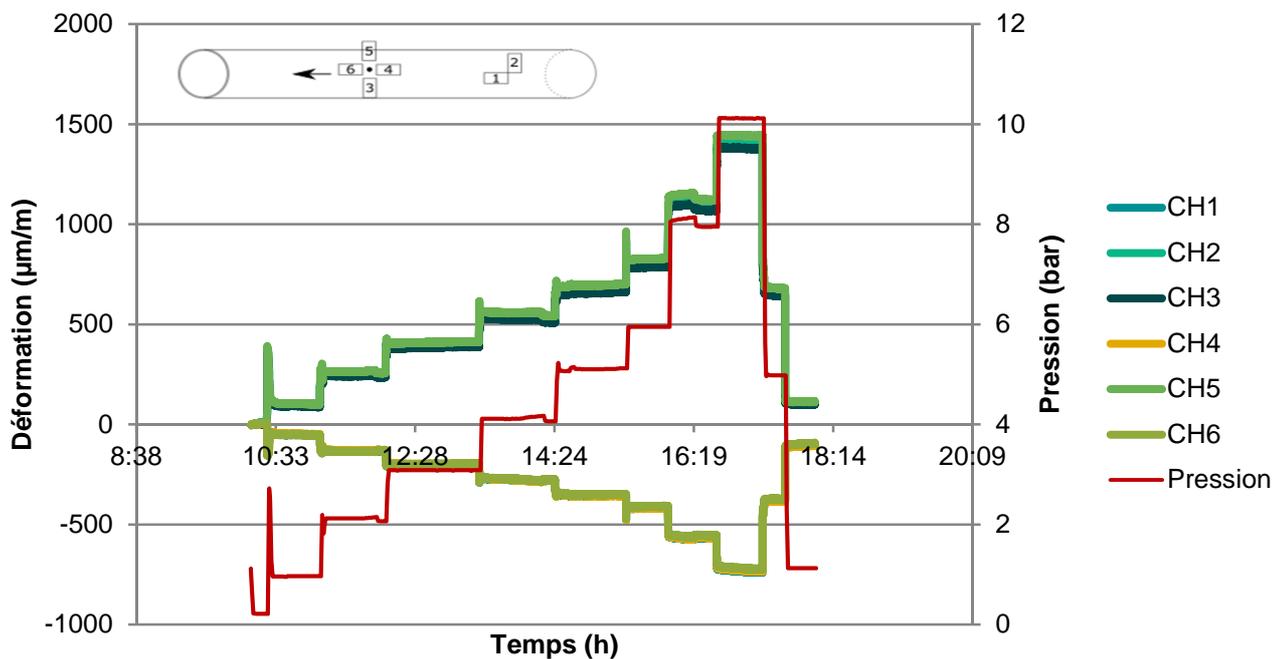


FIGURE 20 : MESURE DE DEFORMATION

On observe la déformation (en $\mu\text{m/m}$) de la zone de fuite par les jauges CH3/ CH4/ CH5/ CH6 (indiquées sur le schéma) et la déformation d'une zone sans fuite avec les jauges CH1/ CH2, qui servent de jauges témoins. Des valeurs positives de déformation impliquent une elongation du matériau, tandis que des valeurs négatives indiquent une contraction.

Plusieurs expériences ont été menées pour observer les paramètres pouvant influencer la déformation de la surface de l'orifice de fuite. Les premiers résultats présentés mettront en avant les effets de température, suivis par une comparaison des valeurs de déformation entre matériau. Les résultats présentés sont ceux obtenus par les expériences menées sur le CE.

MATERIAUX

Les résultats sont présentés par matériau : PVC, Fonte puis PEHD.

Pour le PVC, les données affichées sont celles des expériences PVC E101, E102 et E103.

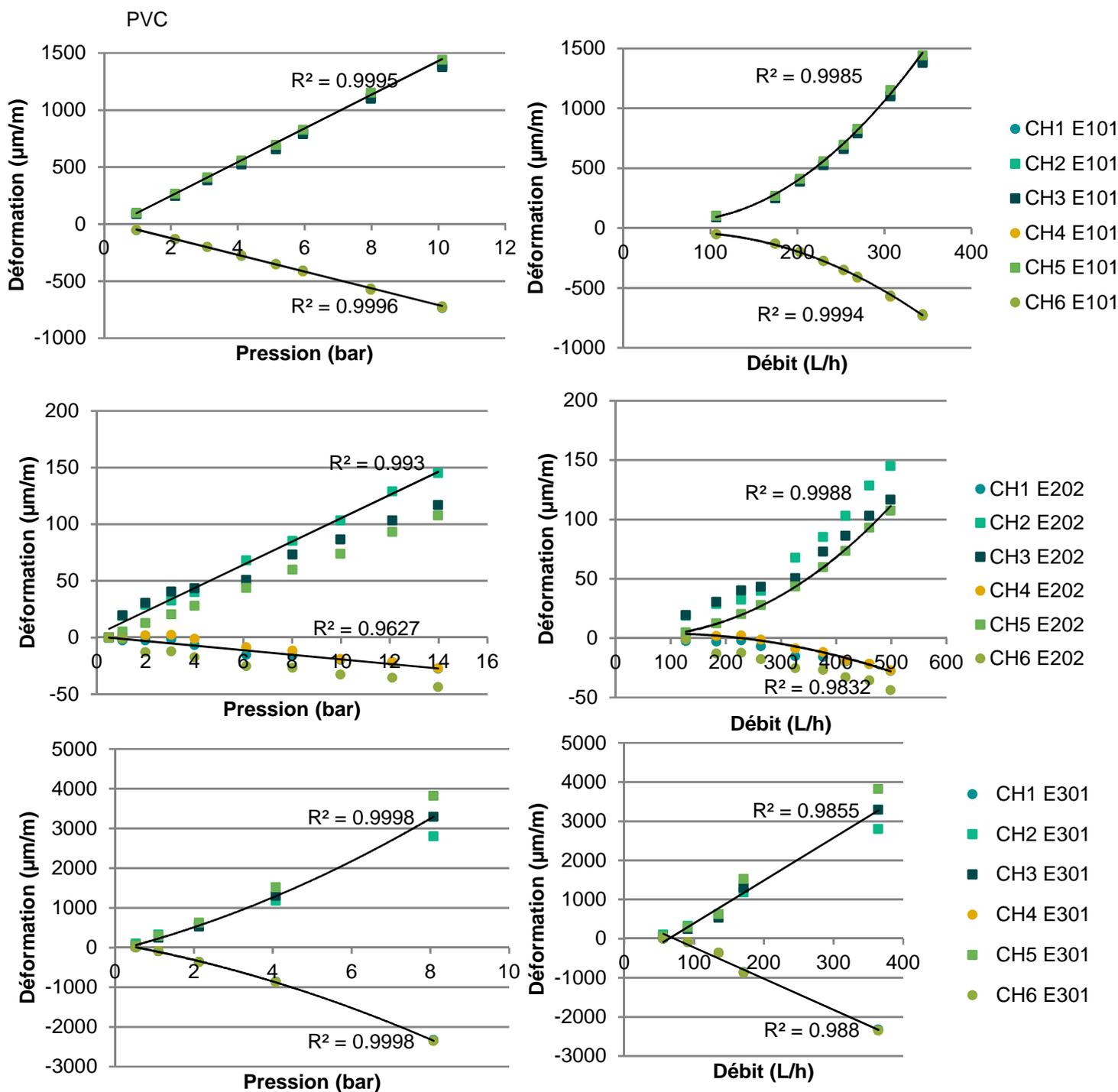


FIGURE 21 : ANALYSE DE DEFORMATION – EFFET DE DEBIT ET PRESSION POUR DE HAUT EN BAS : PVC, FONTE ET PEHD

On peut constater les points suivants :

- L'écart entre les valeurs des jauges témoins situées en extrémité de tuyau et celles situées autour du point de fuite n'est pas remarquable : le tuyau subit les mêmes contraintes au niveau de la fuite et dans tout son ensemble
- La déformation correspond à une elongation pour l'axe transversale, et à une contraction pour l'axe longitudinal

- La contraction est toujours moins importante que l'élongation à pression égale et pour un même matériau
- Pour la Fonte et le PVC, la déformation varie linéairement par rapport à la pression, et varie en suivant une courbe de type polynomiale pour le débit
- Pour le PEHD, la déformation varie en suivant une courbe de type polynomiale de degré 2 pour la pression et le débit
- La déformation est nettement plus importante pour le PEHD (CH3 = 3800 $\mu\text{m/m}$ à P = 8 bars) que pour le PVC (CH3 = 1100 $\mu\text{m/m}$ à P = 8 bars) et pour la Fonte (CH3 = 70 $\mu\text{m/m}$ à P = 8 bars)

EFFET DE TEMPERATURE A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE

L'hypothèse de l'influence de la température sur le comportement de la fuite a été réfutée avec les données de débits des expériences menées sur le pilote. Les jauges permettent d'observer le phénomène d'influence de température à l'échelle microscopique et peut appuyer plus fortement cette hypothèse d'effet de température. Les graphiques ci-dessous comparent les résultats obtenus sur les différents matériaux.

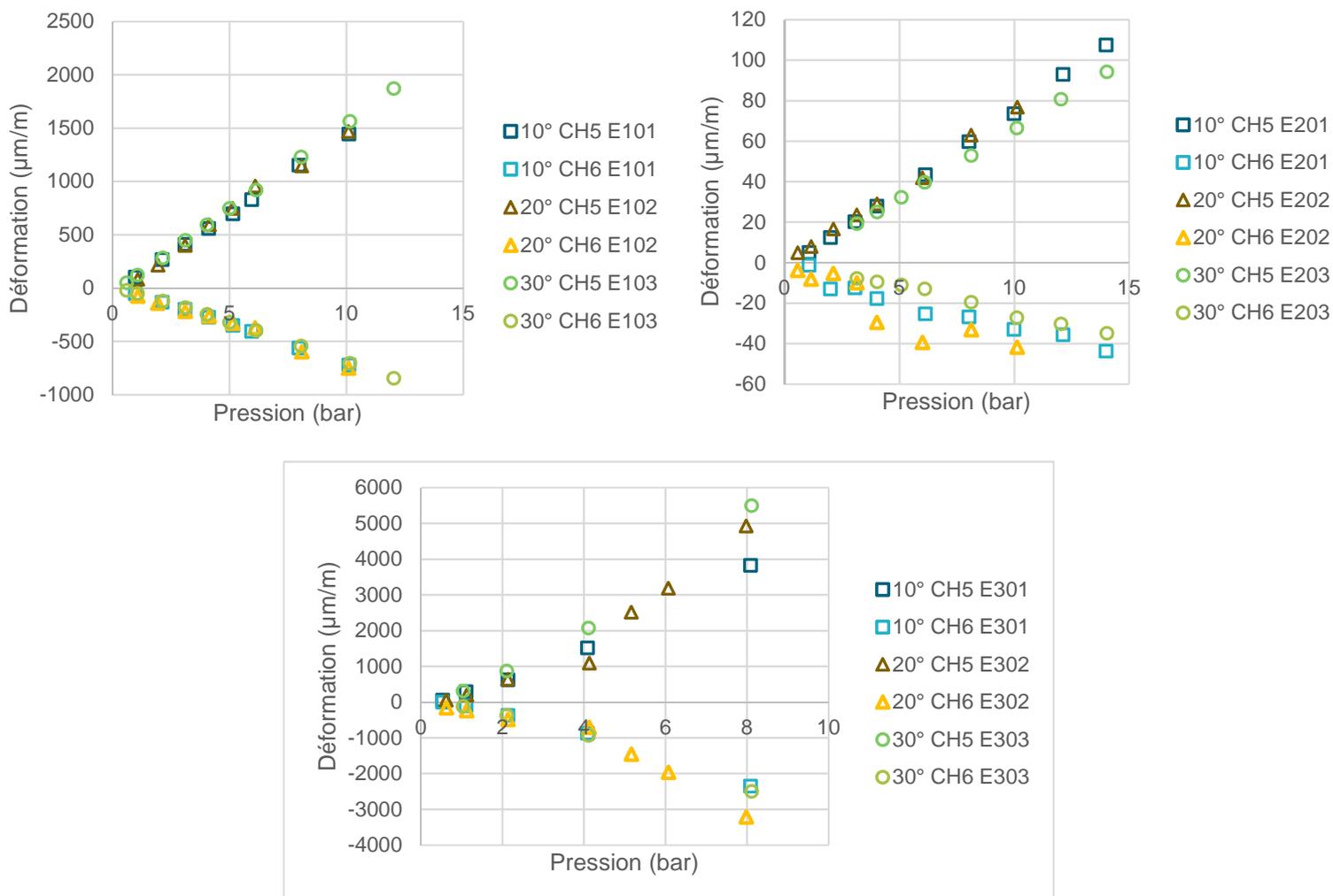


FIGURE 22 : ANALYSE DE DEFORMATION - EFFET DE TEMPERATURE POUR DE GAUCHE A DROITE : PVC, FONTE ET PEHD

On observe que :

- Les courbes de déformation ne varient pas pour la Fonte et le PVC
- A haute pression (P=8 bars), les courbes de déformation indiquent un écart non négligeable pour le PEHD entre 10° et 30° ($D_{CH5 E301} = 3827$ et $D_{CH5 E303} = 5496$, soit une différence de +43%). Cependant, cette différence n'apparaît que dans le sens transversal (déformation positive - élongation du matériau). Dans le sens longitudinal, l'écart entre les jauges CH6 E101 et E301 est plus réduit ($D_{CH6 E301} = -2347$ et $D_{CH6 E303} = -2495$, soit une différence de 6%), et une valeur à 20° plus faible encore ($D_{CH6 E302} = -3213$). Ces dernières valeurs infirment l'influence de la température, malgré les observations faites sur les données de jauges transversales

ELASTICITE – VISCOELASTICITE

Les expériences se déroulent sur deux phases : une phase de montée, où les paliers de pression appliquée au système sont croissants, et une phase descente où les paliers sont décroissants. L'objectif est d'observer la capacité du matériau à se déformer et retrouver son état initial après application de contraintes de pression haute.

La Fonte étant un matériau possédant des propriétés élastiques peu visibles à la déformation dans la plage de mesure de pression considérée, seuls les résultats des expériences menées avec le PVC et le PEHD sont présentées. Les graphiques présentent les données de déformation à 2 et 8 bars à la montée (M) et à la descente (D) pour chacun des deux matériaux. Les valeurs affichées sont les valeurs atteintes pour des paliers de pressions stables.

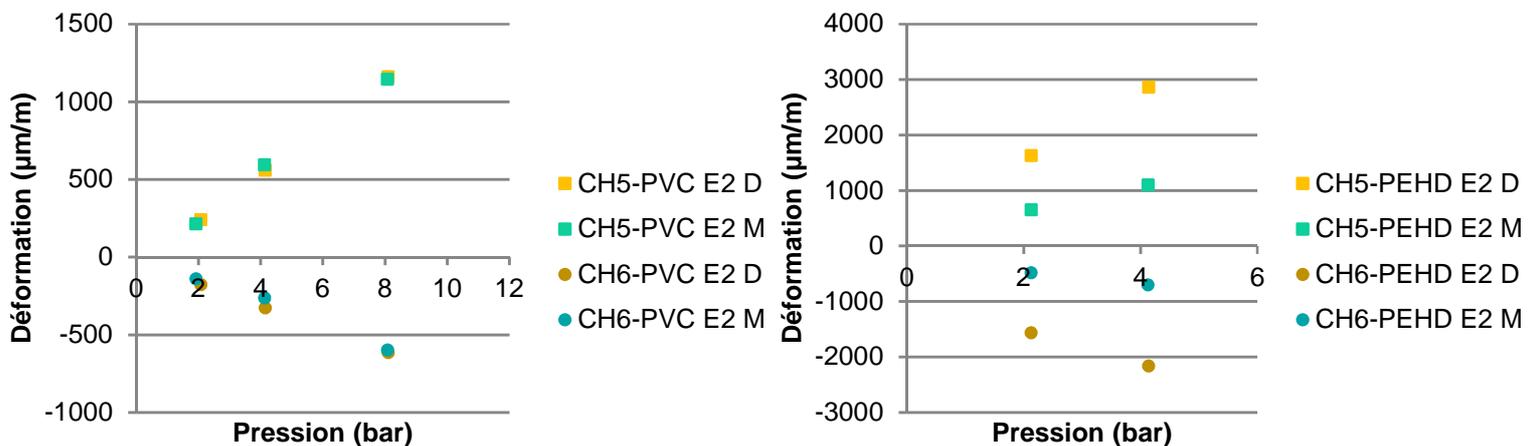


FIGURE 23 : COMPARAISON DE LA DEFORMATION ENTRE PALIERS DE DESCENTE (D) ET DE MONTEE (M)

On remarque que les valeurs de déformation du PVC restent inchangées entre les valeurs de descente et de montée. Pour le PEHD en revanche, les valeurs observées varient jusqu'à +150% pour la déformation transversale (élongation) et +200% pour la déformation longitudinale (contrainte).

D'après les résultats observés, nous pouvons avancer les points suivants :

- Pour les trois matériaux, la température ne semble pas à avoir d'impact significatif sur la déformation du matériau à l'échelle microscopique et par conséquent sur le débit
- Le comportement de la fuite n'est pas affecté par la réaction d'un matériau de type Fonte face aux variations de pression : la déformation est alors quasiment inexistante même à pression haute.
- Le PVC possède un caractère élastique, engendrant une déformation notable, lors de l'élévation de la pression et lui permettant de retrouver sa forme initiale après abaissement de celle-ci. Cette déformation évolue linéairement vis-à-vis de la pression.
- Le PEHD a un comportement viscoélastique, justifiant la déformation importante du matériau lors de montée à pression haute, et expliquant le retour à un palier de déformation différent lors de la variation à pression plus basse et ce sur un temps de manipulation relativement court. On peut aussi constater, que contrairement au PVC et à la Fonte, la déformation du PEHD ne s'effectue pas linéairement par rapport à la pression.

1.4. TRAITEMENT D'IMAGE

Pour les expériences en CE, des photos de la fuite sont prises pour chaque palier de pression stable atteint. L'objectif est de capturer la déformation de l'orifice au cours de l'expérience et de la mesurer via un logiciel de traitement d'image.



FIGURE 24 : DISPOSITIF DE CAPTURE D'IMAGE

Pour cela, une caméra est installée dans l'alignement de l'axe de la fuite. Le tuyau est peint en blanc autour du point de fuite pour obtenir un meilleur contraste lors de l'analyse d'image. Pour optimiser la qualité d'image, les photos sont prises avec et sans éclairage : le CE est équipé de LED blanches qui fournissent une source de lumière constante avec un effet de chauffage négligeable.

RESULTATS

Trois méthodologies sont testées pour le traitement d'image sur Image J.

La 1^{ère} méthode consiste à calculer l'aire de la surface de l'orifice tracée à main levée. Cette méthode est la moins précise des trois, mais elle permet contrairement aux deux autres de s'affranchir des effets de vaporisation par déduction des contours de l'orifice (jusqu'à un certain point).

La 2^{ème} méthode consiste à calculer le nombre de pixels contenu dans la surface de l'orifice en binarisant l'image (pixels noirs = orifice de fuite, pixels blanc = tuyau). Cette méthode est précise aux pressions basses (inférieure à 4 bars), mais est limitée aux pressions plus élevée à cause de la vaporisation qui détériore la qualité de l'image et empêche une binarisation de l'image correcte.

La 3^{ème} méthode utilise l'outil « Find edge » permettant de détecter les contours de manière automatique, après binarisation de l'image. Elle présente les mêmes avantages et inconvénients que la 2^{ème} méthode.

Les résultats de l'expérience E101 (PVC) et E202 (Fonte) sont affichées ci-après.

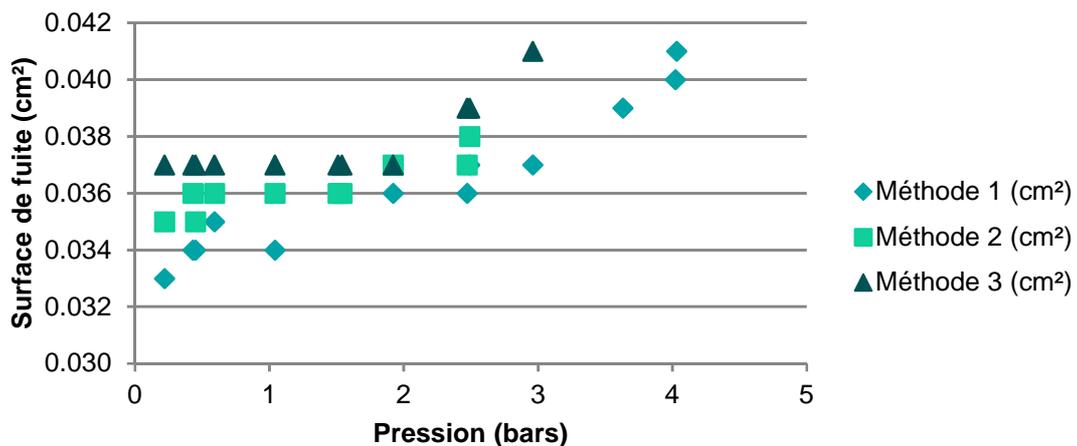


FIGURE 25 : MESURE DE LA SURFACE DE FUITE SELON DIFFERENTES METHODES – E101 (PVC)

Au vu de la précision de mesure, l'analyse des résultats est qualitative. On tend pour les trois méthodes à une augmentation de la surface de fuite : on observe une variation de +24% pour la Méthode 1 entre 0.5 et 4 bars, +9% entre 0.5 et 2.5 bars pour M2 et 11% entre 0.5 et 3 bars pour Méthode 3. On constate donc que l'augmentation de la pression déforme l'orifice de fuite pour un matériau de type élastique. Pour comparaison, les résultats de la Fonte sont exposés ci-après avec l'utilisation de Méthode 3.

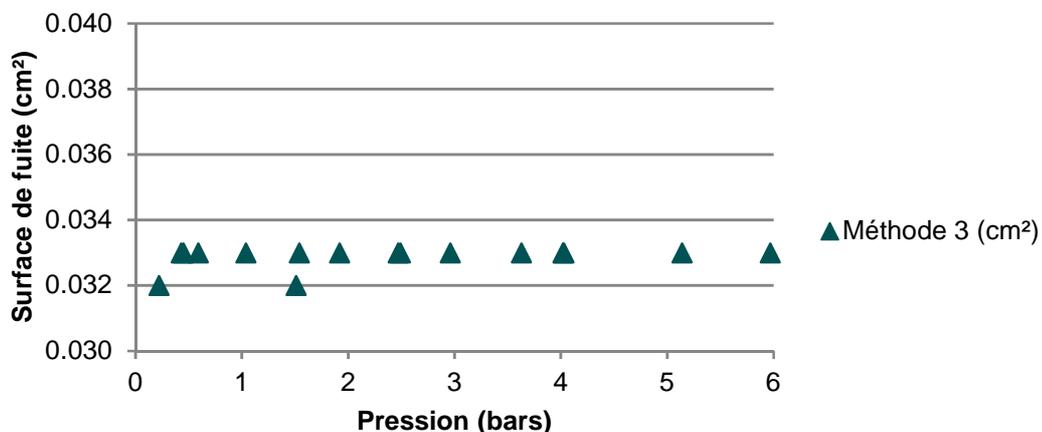


FIGURE 26 : MESURE DE LA SURFACE DE FUITE – E202 (FONTE)

On ne constate aucune variation de la surface de l'orifice de fuite, justifiée par le caractère dur du matériau dans la gamme de pression considérée. Une déformation pourrait être cependant observable à des pressions plus élevées, mais un phénomène de vaporisation n'a pas permis une prise d'image correcte et empêché l'analyse des pressions supérieures à 4 bars. La figure ci-dessous met en évidence la vaporisation : de gauche à droite, les paliers appliqués sont $P = 0.5$ bar, $P = 4$ bars et $P = 6$ bars.

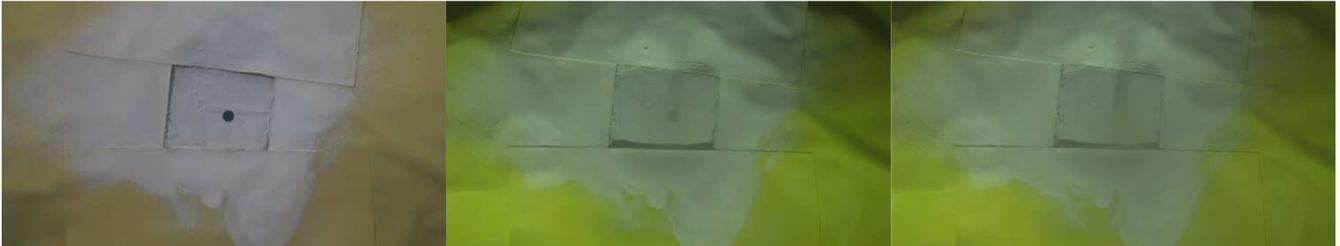


FIGURE 27 : VAPORISATION A PRESSIONS HAUTES (SUPERIEURES A 4 BARS)

IV. EXPERIMENTATIONS SUR RESEAU SEMI-REEL

En 2018, une convention a été signée avec l'Office de l'Eau de Limoges, mettant à notre disposition son réseau expérimental pour nos recherches sur les mesures de quantification de fuites.

Après présentation du site expérimental, le protocole de mesure sera détaillé et suivi d'une synthèse des résultats acquis au cours de nos campagnes de mesure.

1. LE SITE D'ETUDE

Le réseau du site est indépendant du réseau de distribution de l'agglomération de Limoges et les manipulations peuvent être effectuées sans impacter les abonnés.

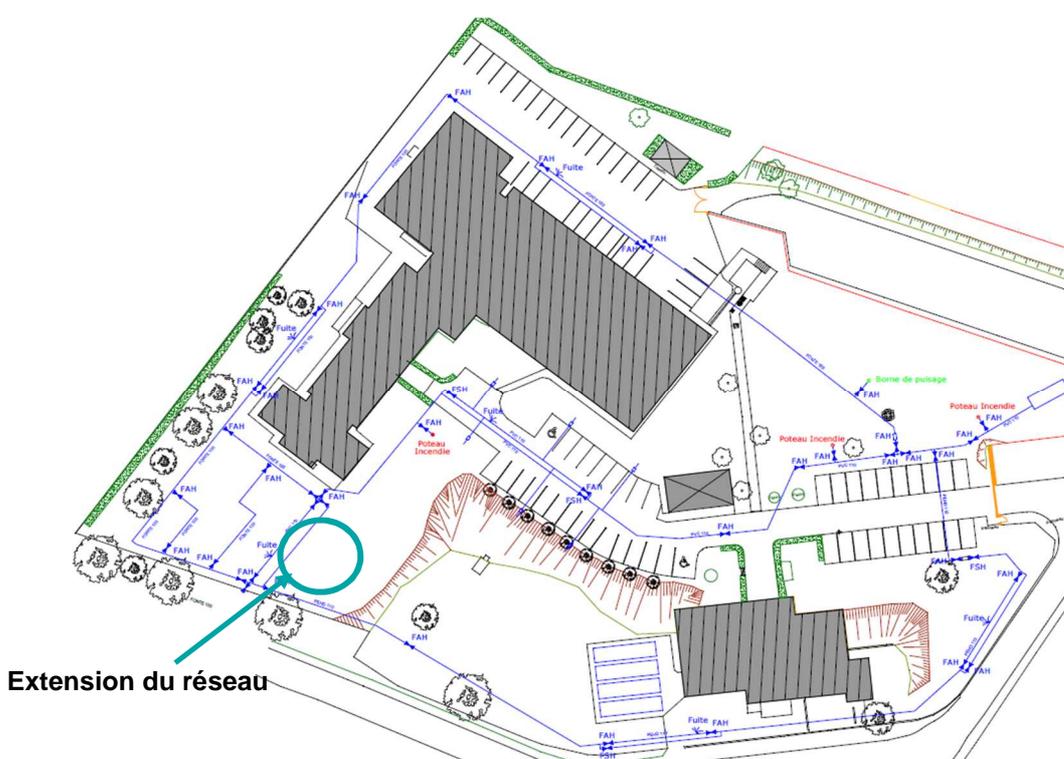


FIGURE 28 : SCHEMA DU RESEAU DE L'OFFICE

Le réseau est constitué de canalisations en Fonte DN100, PVC DN110 et PEHD DN110. Sur ces canalisations a été percé un total de 8 fuites calibrées. On trouve aussi 5 compteurs de débit et 6 points de mesure de pression, répartis sur l'ensemble du réseau. Une première série de tests a permis d'étudier le réseau et évaluer sa pertinence vis-à-vis de nos expériences sur pilote. Il a été observé que certains éléments inhérents au réseau altéreraient les mesures (fuites non prévues suspectées, fuites d'origine non calibrées, etc.). Afin d'éliminer ces perturbations, une extension au réseau de départ a été créée pour rétablir un environnement de mesure contrôlé (cf. figure 29).

L'extension, située sur la partie sud-ouest du réseau, comprend les éléments suivants :

- Un tuyau PVC DN110 percé d'un trou calibré de 2 mm
- Un tuyau PEHD DN110 percé d'un trou calibré de 2 mm
- Un tuyau Fonte DN100 percé d'un trou calibré de 2 mm
- Un branchement sur F100 avec prise en charge (PEC) dont le joint fuit
- Un tuyau Fonte DN100, relié à une bouche incendie

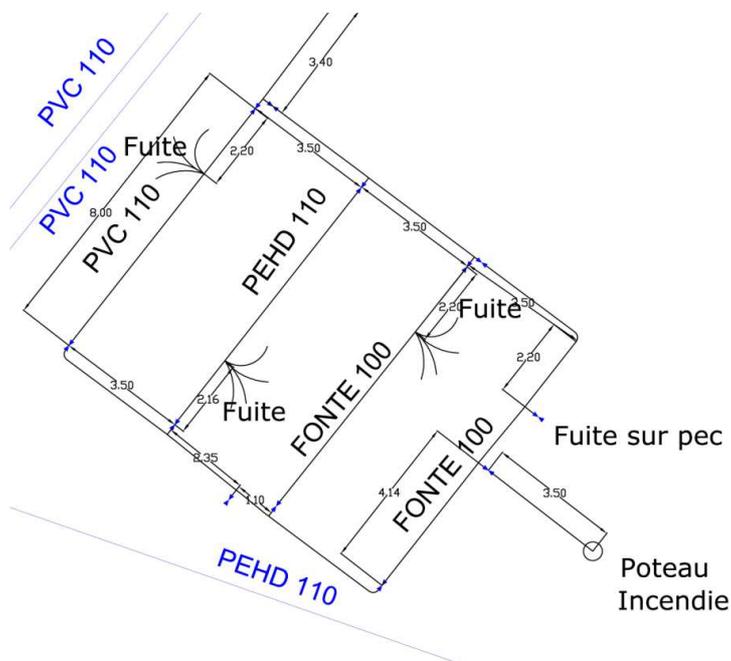


FIGURE 29 : EXTENSION DU RESEAU REALISEE FIN 2019

2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'objectif est de mesurer le débit des différentes fuites à pression constante (pression du réseau soit 4 bars). Plusieurs protocoles ont été testés, s'adaptant au fur et à mesure aux différents appareils de mesure fournis par l'Office, jusqu'à obtenir un protocole expérimental nous permettant l'obtention de résultats de mesure stables et reproductibles.

| Étape | Descriptif |
|-------|---|
| 1 | Vérification des vannes à fermer et ouvrir |
| 2 | Remplissage du réseau |
| 3 | Atteinte du régime de pression stable et débit nul |
| 4 | Ouverture des vannes de la fuite mesurée |
| 5 | Stabilisation des mesures de pression et de débit pour a minima 1h (compter 8h pour la fuite sur PEC) |
| 6 | Fermeture des vannes de la fuite mesurée |

TABLEAU 9 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL SUR RESEAU DE L'OIEAU

Le protocole est relativement simple dans sa mise en place. Afin de s'assurer du bon suivi de l'expérience il nécessite une certaine assiduité, notamment dans la prise de note des heures d'ouverture et/ou de fermeture des vannes au cours de la manipulation.

3. RESULTATS

Les résultats exposés ici ne concernent que les résultats exploitables obtenus avec les expériences menées sur la nouvelle raquette. Pour rappel, la fuite 9 (F9) est située sur la canalisation PVC DN110, la fuite 10 sur la canalisation en PEHD (F10), la fuite 11 sur la canalisation en Fonte DN100, et la fuite 12 sur la PEC du poteau d'incendie.

1.1. PROFIL TYPE D'EXPERIENCE

Un stabilisateur est utilisé en entrée du regard de comptage pour fixer la pression de départ. Par conséquent la pression mesurée reste quasiment constante. Il est aussi à préciser que les manipulations ont été réalisées sur une même période de l'année, et donc que la température du sol et de l'eau était constante entre chaque expérience.

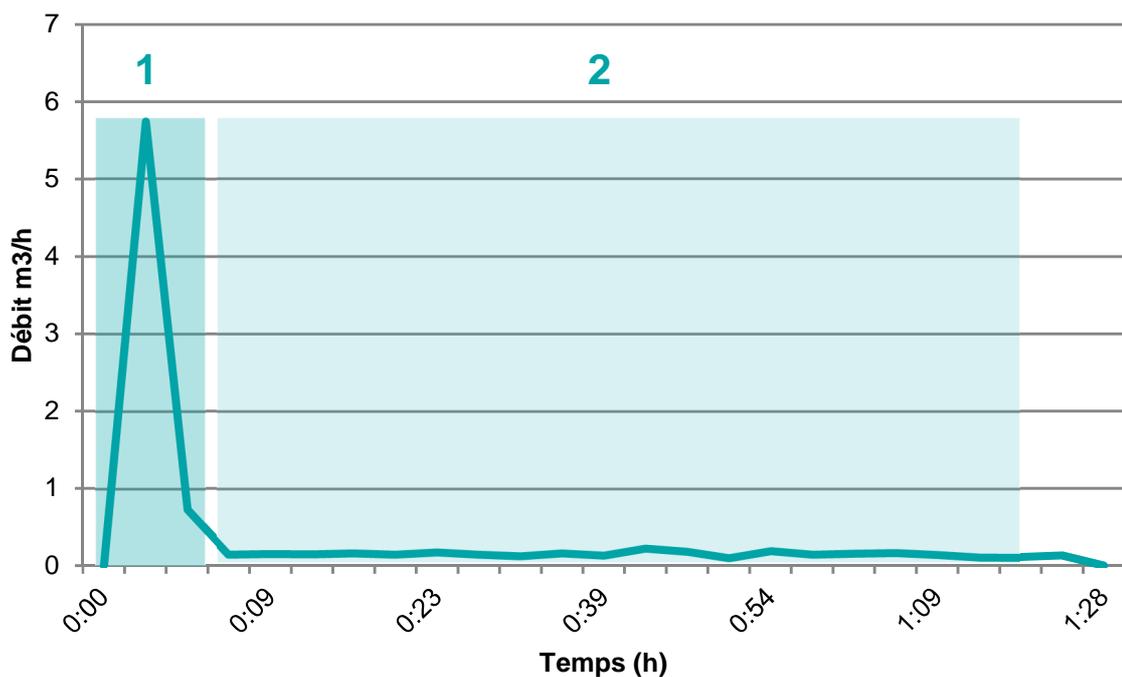


FIGURE 30 : PROFIL D'UNE MESURE DE FUITE (ICI F9)

On observe deux phases lors de la mesure (fig. 11) :

- Une 1^{ère} phase de transition avec une montée de débit soudaine puis descente, correspondant à l'ouverture de la vanne et le remplissage de la canalisation
- Une 2^{ème} phase de stabilisation correspondant à l'établissement d'un régime de débit permanent

1.2. DEBIT ET PRESSION

Pour l'exploitation des débits et pressions, les phases d'ouverture et fermeture de vannes ont été supprimées, pour ne visualiser que les débits et pressions mesurés en régime permanent.

Après atteinte du régime permanent, on note pour chaque fuite les résultats suivant (tab.10) :

| Fuite | $Q_{\text{fuite}} \text{ moyen (m}^3/\text{h)}$ | Min. $Q_{\text{fuite}} \text{ (m}^3/\text{h)}$ | Max. $Q_{\text{fuite}} \text{ (m}^3/\text{h)}$ | Variance $\sigma(Q_{\text{fuite}})$ | $P_{\text{moyen}} \text{ (bar)}$ |
|-------|---|--|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| 9 | 0,157 | 0,107 | 0,232 | 8,65E-04 | 4,13 |
| 10 | 0,187 | 0,139 | 0,255 | 9,66E-04 | 4,07 |
| 11 | 0,129 | 0,109 | 0,149 | 1,10E-04 | 4,03 |
| 12 | 0,025 | 0,022 | 0,030 | 3,44E-06 | 4,07 |

TABLEAU 10 : RESULTATS DE MESURE RAQUETTE

Pour faire la comparaison avec le modèle établi, le débit de fuite est représenté en fonction de la pression appliquée au réseau sur la figure ci-dessous. Les courbes de modèle sont calculées pour un diamètre d'orifice A1 ($D=2\text{mm}$), identique au diamètre de fuite des tuyaux testés, et selon les coefficients α et β associés à chacun des matériaux du CE.

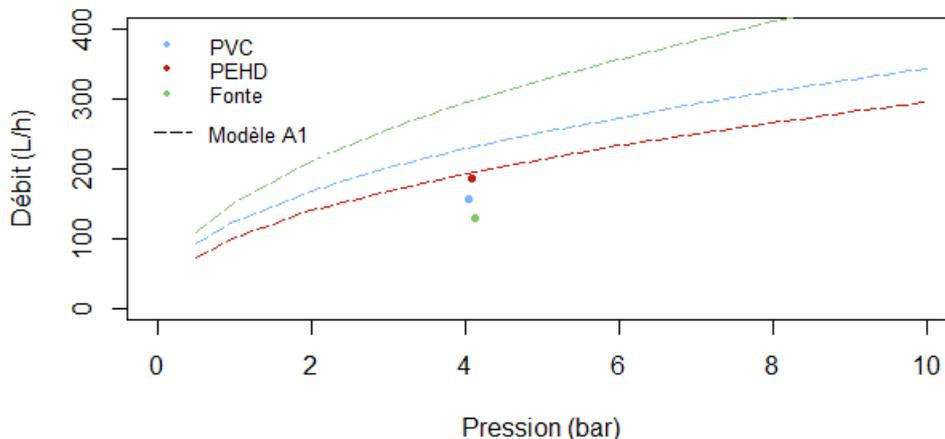


FIGURE 31 : VALEURS DES DEBITS MESURES EN COMPARAISON DU MODELE

Plusieurs points sont à relever:

- Les valeurs de terrain se situent toutes en dessous de la courbe du modèle établi de débit de fuite dans l'eau
- À pression équivalente et pour un même diamètre de l'orifice de fuite, les débits de fuite diffèrent suivant les matériaux : on obtient $Q_{\text{PEHD}} = 187 \text{ L/h}$, $Q_{\text{PVC}} = 157 \text{ L/h}$ et $Q_{\text{FNT}} = 129 \text{ L/h}$

Ces points mettent en évidence l'effet de sol sur la fuite. La courbe du modèle étant établie pour une fuite circulaire hors sol, des valeurs inférieures confirment l'hypothèse d'une contrainte exercée par le sol sur l'orifice de fuite.

On remarque de plus une réaction différente des trois fuites pourtant à pressions égales. Par rapport au débit F9 (PVC), on observe un débit 19% plus important pour la fuite F10 (PEHD) et un débit 18% plus faible pour la fuite F11 (Fonte). On peut émettre plusieurs hypothèses :

- Les matériaux réagissent différemment à la contrainte de pression, comme vu sur les expériences pilote et lors de l'établissement du modèle
- Le compactage du sol n'est pas homogène sur les trois points de fuite et n'offre pas la même résistance au débit sortant
- Les diamètres de fuite sont légèrement différents les uns des autres, malgré un perçage minutieux mais fait sur site

Une deuxième série de mesure sur la raquette a été réalisée à l'Office de l'eau au mois de février 2021. Des mesures de compactage du sol ont été effectuées autour de chacun des points de fuite afin de vérifier les hypothèses et d'offrir une comparaison plus précise avec les mesures effectuées sur le CS. La manipulation a été menée avec le dispositif de mesure mobile, dont le fonctionnement est détaillé dans la prochaine partie.

Les résultats sont exposés sur le graphique ci-dessous. La pression a pu être réglée par palier, de 1, 2, 4 et 8 bars, pour chaque fuite tour à tour.

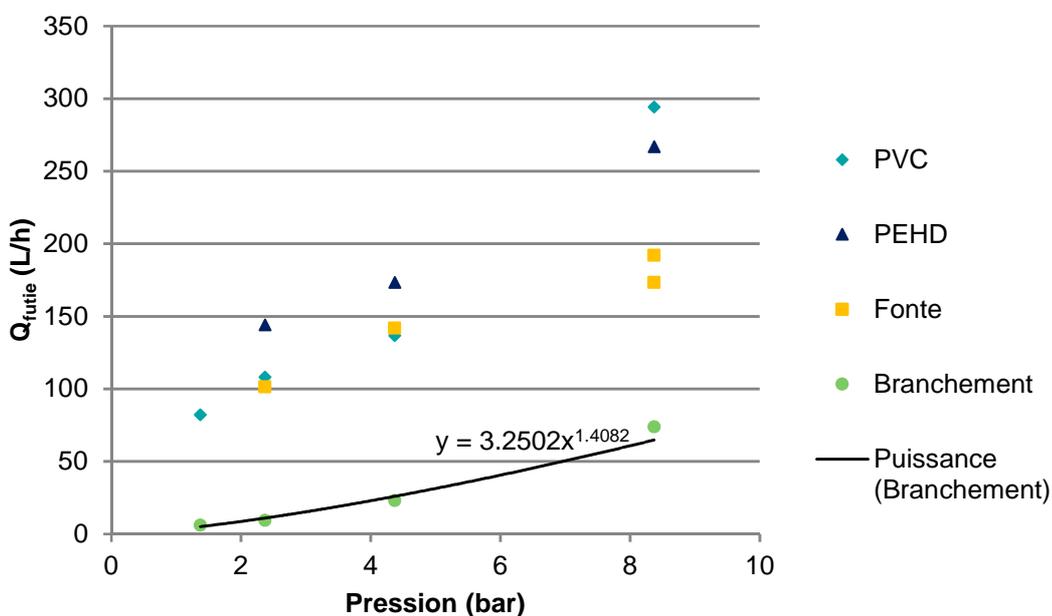


FIGURE 32 : COMPARAISON DE DEBIT DE FUITE A PRESSIONS VARIABLES

On observe que :

- La fuite sur branchement ne suit pas la courbe théorique en racine (où coefficient $b_1=0.5$, cf. §II.2.) mais une courbe de puissance où b_1 se rapproche d'une valeur 1.5
- Les fuites sur PVC, PEHD et Fonte suivent une courbe théorique en racine, jusqu'à 4 bars pour tous, jusqu'à 8 bars pour la Fonte
- À 8 bars, les valeurs de débit du PVC et du PEHD se décrochent de la courbe initiale (0-4 bars)
- Les valeurs de débit à 4 bars sont similaires aux valeurs trouvées avec la première manipulation sur raquette avec des variations allant de -10% à 13% sur le débit de fuite initial suivant les matériaux

On peut confirmer que le comportement du débit de fuite varie en fonction de la géométrie de l'orifice de fuite : la fuite sur branchement est une entaille de quelques mm et montre une réaction différente lors de la montée en pression du tuyau par rapport aux fuites correspondant à des orifices circulaires.

On constate un potentiel phénomène de fluidisation à 8 bars pour le PVC et PEHD. Ce phénomène semble intervenir de manière non prédictible puisqu'il n'est pas apparu pour la Fonte. Cependant, la fluidisation du milieu poreux semble être plus apte à se faire à haute pression (supérieure à 4 bars) et au bout d'un temps conséquent de manipulation, expliquant les débits faibles à 1,2 et 4 bars (PVC et PEHD).

V. QUANTIFICATION DES FUITES SUR RESEAU AEP

Le dispositif de mesure mobile a pour but de détecter et mesurer avec précision les pertes d'une fraction isolée d'un réseau réel d'eau potable. Il est constitué d'un fourgon tracté, contenant un circuit hydraulique permettant, en se branchant directement sur le réseau d'eau public, la quantification de fuites.

Le fonctionnement du dispositif introduira cette partie. Il s'en suivra la présentation des partenaires, des différents lieux de mesure, puis les résultats obtenus sur le terrain.

1. FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF

1.1. BOUCLE HYDRAULIQUE

La partie hydraulique est constituée d'un ensemble de canalisations, DN 100 pour la première boucle (entrée, by-pass, sortie via le compteur de DN 100), en DN 80 pour le by-pass de mesure, et en DN 32 pour la purge de l'installation. La sortie de purge est équipée d'un raccord rapide permettant un raccordement à un tuyau d'évacuation. Cette purge permet également l'injection d'une solution désinfectante de peroxyde d'hydrogène dans le circuit hydraulique pour respecter les normes sanitaires en vigueur. Ce système alimente deux cuves d'une contenance totale de 1000L (environ 700L utiles).

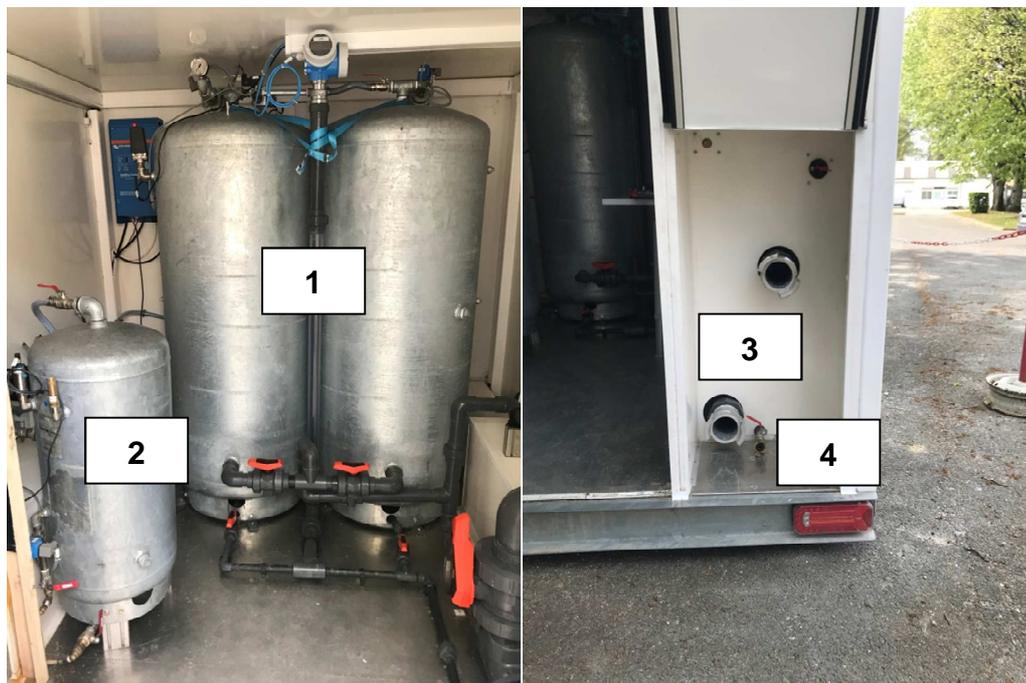


FIGURE 33 : CUVES (1), SYSTEME DE REGULATION DE PRESSION (2), ENTREE ET SORTIE (3) ET PURGE (4) DU CIRCUIT D'EAU

Un compresseur d'air est installé et gère la régulation de pression par injection d'air dans les cuves. Cette régulation de pression est aussi effectuée de manière secondaire via une vanne pilotée.

1.2. PARAMETRES MESURES

Les valeurs de pression, de débit, de température et de hauteur de cuve sont mesurées et enregistrées dans le système de télégestion intégré à la remorque.



FIGURE 34 : CANALISATIONS ET APPAREILS DE MESURE

PRESSION

La mesure de pression est réalisée en sortie d'installation. Cette mesure est faite avec un capteur dont la précision est de 0.1 % de la valeur de la mesure sur la plage 0.5 – 10 bars.

DEBIT

Le débit est mesuré via deux compteurs, l'un placé sur la canalisation en DN100 et l'autre sur la canalisation en DN32 avec réduction pour le compteur. Ils sont complémentaires et permettent à eux deux de recouvrir une gamme de mesure allant de 16 L/h à 80 m³/h.

| Diamètre | DN | 25 | 80 |
|------------------------------------|------|-----------------|------------------|
| Débit permanent (Q3) | m3/h | 6,3 | 63 |
| Ratio Q3/Q1 | | 400 | 500 |
| Débit de surcharge (Q4) | m3/h | 7,9 | 80 |
| Débit minimum (Q1) | L/h | 15,75 | 126 |
| Pression maximale | bar | | 16 |
| Plage de température fonctionnelle | °C | +0,1°C....+70°C | +0,1°C.....+50°C |

TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES DES DEBITMETRES UTILISES

TEMPERATURE

La mesure de température est faite en sortie de l'installation à l'aide d'une sonde PT100 de classe A. La précision de mesure est de 0,15°C.

HAUTEUR D'EAU

La hauteur d'eau de cuve est mesurée avec l'aide d'un transmetteur de niveau radar et indicateur de niveau magnétique, doté d'une précision de 3mm. La mesure de hauteur est commune aux 2 cuves qui fonctionnent à l'équilibre. Cette mesure permet d'établir une double vérification sur la mesure de débit. Pour une meilleure précision de mesure du niveau, on peut choisir de travailler sur une seule des deux cuves.

PARTIE AUTOMATISME

L'automate utilisé est un S4W de SOFREL. Il permet d'enregistrer les mesures et les états des différents capteurs. Des programmes sont disponibles pour les différentes fonctions (enregistrement des valeurs, régulation par le régulateur de pression, régulation par la compression d'air, etc.).

1.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

L'objectif de la manipulation est de se brancher sur une portion de réseaux isolé supposé fuyard, pour quantifier la ou les fuites suspectées.

| Étape | Descriptif |
|-------|--|
| 1 | Désinfection du système hydraulique de la remorque |
| 2 | Branchement au Poteau ou Bouche Incendie (PI-BI) |
| 3 | Remplissage des cuves |
| 4 | Isolation de la portion de réseau concernée |
| 5 | Injection d'eau à pression régulée dans le réseau par palier |
| 6 | Mesure et enregistrement du débit sortant |
| 7 | Débranchement du PI |
| 8 | Purge du système |

TABEAU 12 : PROTOCOLE POUR MESURE SUR RESEAU AEP

Le système de mesure permet d'atteindre des paliers de pression de 8 bars. Ceci étant, le palier de pression maximal est ajusté à la pression maximale habituellement appliquée au réseau concerné. Une fois le palier de pression atteint et le débit de fuite, s'il existe, stabilisé, la pression est diminuée progressivement pour quantifier le « bénéfice » en terme de fuite.

Le temps d'essai est dimensionné par le palier de pression maximal fixé et le débit de fuite de la portion de réseau étudiée. Globalement, le temps d'une mesure de débit exploitable peut être majoré à une heure.

2. CAMPAGNE DE MESURE

Le site utilisé pour les mesures doit idéalement comprendre un nombre de fuites non négligeables, posséder des PI-BI pour le branchement du dispositif de mesure, et être isolable par fermeture de vannes étanches. Le réseau du syndicat VBG, géré par la Saur, a été choisi comme terrain d'étude pour mener cette campagne de mesure. Sur place, nous avons été assisté par les agents SAUR en charge du secteur en délégation de service public, sur le secteur de Saint-Yrieix-la-Perche.

1.1. CRITERES DE SELECTION DES SITES DE MESURE

Avant d'effectuer une manipulation sur site, une visite est réalisée pour vérifier :

- La présence d'un ou plusieurs PI pour le branchement au réseau, et leur bon fonctionnement
- L'étanchéité des vannes d'isolement
- Le nombre d'abonnés présents sur la portion étudiée, et éventuellement visiter les abonnés pour sensibiliser à l'intérêt de l'opération et estimer la gêne potentiellement occasionnée par les essais
- La ligne piézométrique du secteur ciblé, afin de déterminer les pressions pouvant être appliquées lors de la mesure

Cette vérification a permis d'éliminer plusieurs sites ne correspondant pas aux critères requis. Les secteurs finalement retenus sont situés sur les communes de Saint-Yrieix-la-Perche, de Coussac-Bonneval et de la Roche l'abeille:

- Gare Nord Coussac
- Gare Sud Coussac
- La Roche l'abeille
- Saint-Priest - Ligoure
- Saint Yrieix Aviateurs

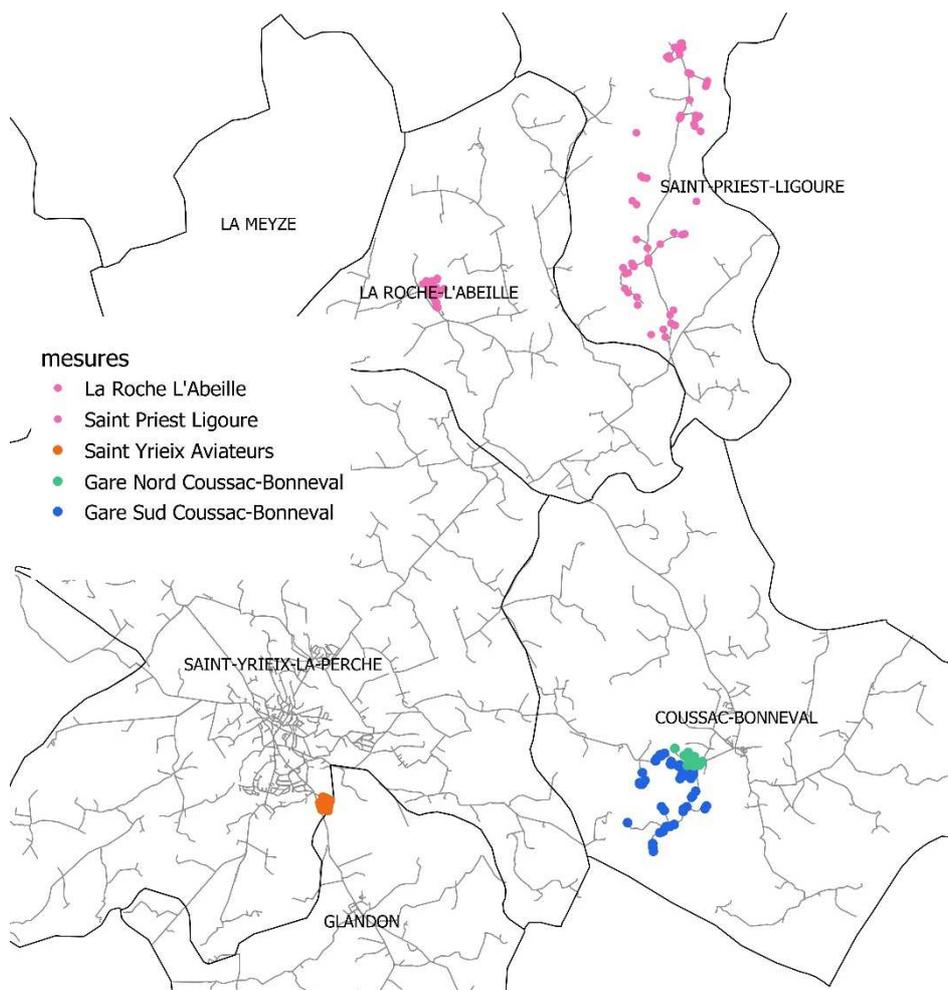


FIGURE 35 : RESEAU AEP AUTOUR DE SAINT-YRIEIX-LA-PERCHE ET ABONNES DES SECTEURS ETUDIES

1.2. CARACTERISTIQUES DES SITES DE MESURE

Une visite a été effectuée en amont de la semaine de mesure pour vérifier l'état des PI et la faisabilité des manipulations. Les informations relatives à chacun des sites sont répertoriées ci-dessous.

SECTEUR S1 « GARE NORD COUSSAC »

Le branchement est possible sur PI, et après vérification la vanne pour isolation est bien étanche. L'antenne comprend un total de **21 abonnés**, pour un linéaire d'environ **1 km**, composé uniquement de PVC 63.

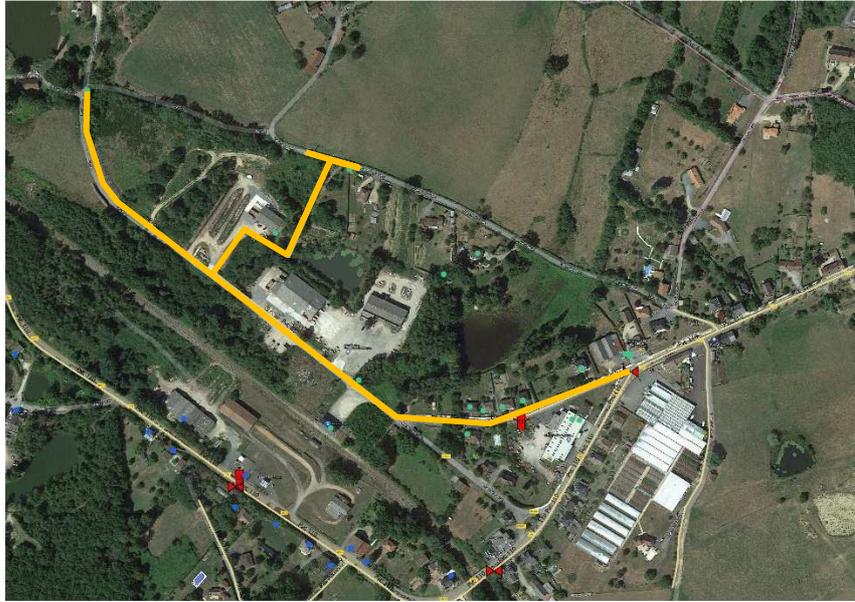


FIGURE 36 : SECTEUR " GARE NORD COUSSAC"

Les tests pré expérimentaux réalisés au PI avec un débitmètre LHenry mesure les caractéristiques suivantes :

- Une pression en statique à 3,5 bars
- A P = 2 bars, $Q_{PI} = 16 \text{ m}^3/\text{h}$
- A P= 1 bar, $Q_{PI} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$

La ligne piézométrique du secteur permet d'établir des points de mesure entre 2 et 4 bars.

SECTEUR S2 « GARE SUD COUSSAC »

Le branchement est possible sur PI. Deux vannes étanches sont présentes en amont du PI permettant possiblement une isolation du secteur en deux sous-secteur. Le secteur regroupe un total de **62 abonnés**, pour un linéaire d'environ **6 km** (avec un premier sous-secteur à 2 km et un deuxième à 4 km). Les canalisations sont composées de PVC uniquement réparties en PVC110(PI), PVC75 et PVC63.

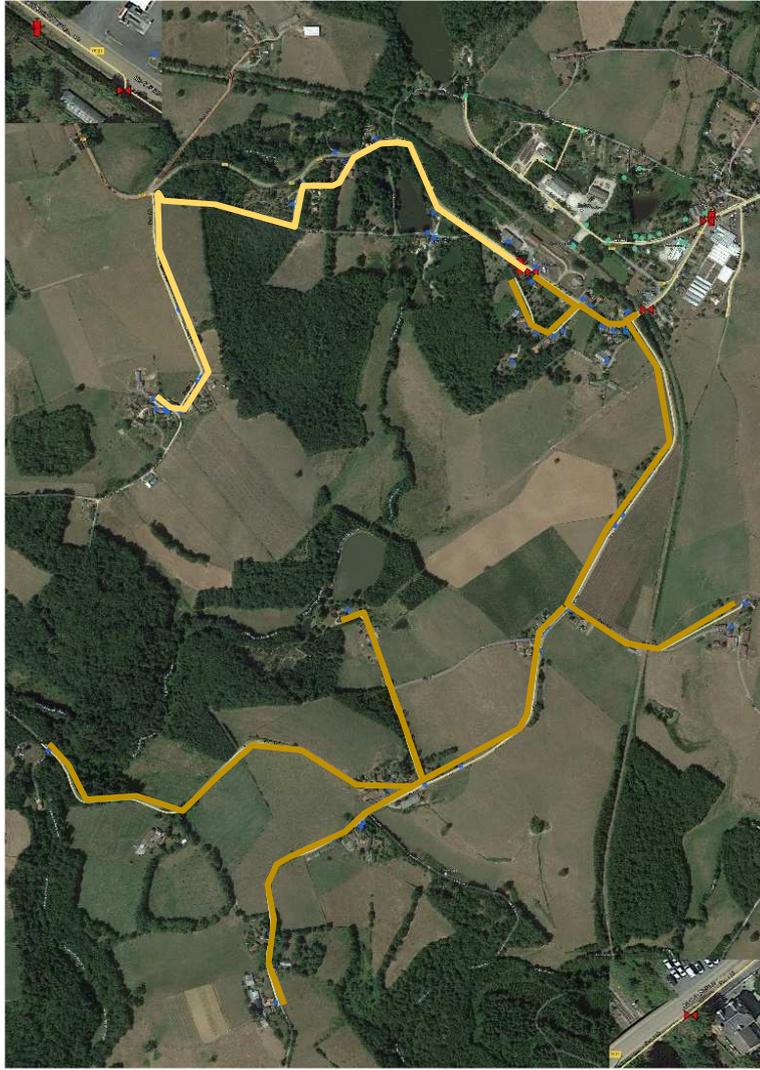


FIGURE 37 : SECTEUR "SUD GARE COUSSAC" ET SES SOUS-SECTEURS

Les tests pré expérimentaux réalisés au PI avec un débitmètre LHenry mesure les caractéristiques suivantes :

- Une pression en statique à 4 bars
- A P = 0.5 bars, $Q_{PI} = 9 \text{ m}^3/\text{h}$

La ligne piézométrique du secteur permet d'établir des points de mesure entre 2 et 4 bars.

SECTEUR S3 « LA ROCHE L'ABEILLE »

Le branchement est réalisable sur PI. Une vanne assure l'étanchéité du secteur isolé. Le secteur regroupe un total de **60 abonnés**, pour un linéaire d'environ **2 km**. Il est à noter la présence d'une école et donc les possibles tirages fréquents qui pourrait fausser les mesures. Les canalisations sont composées de PVC110 au niveau du PI, et de F80.

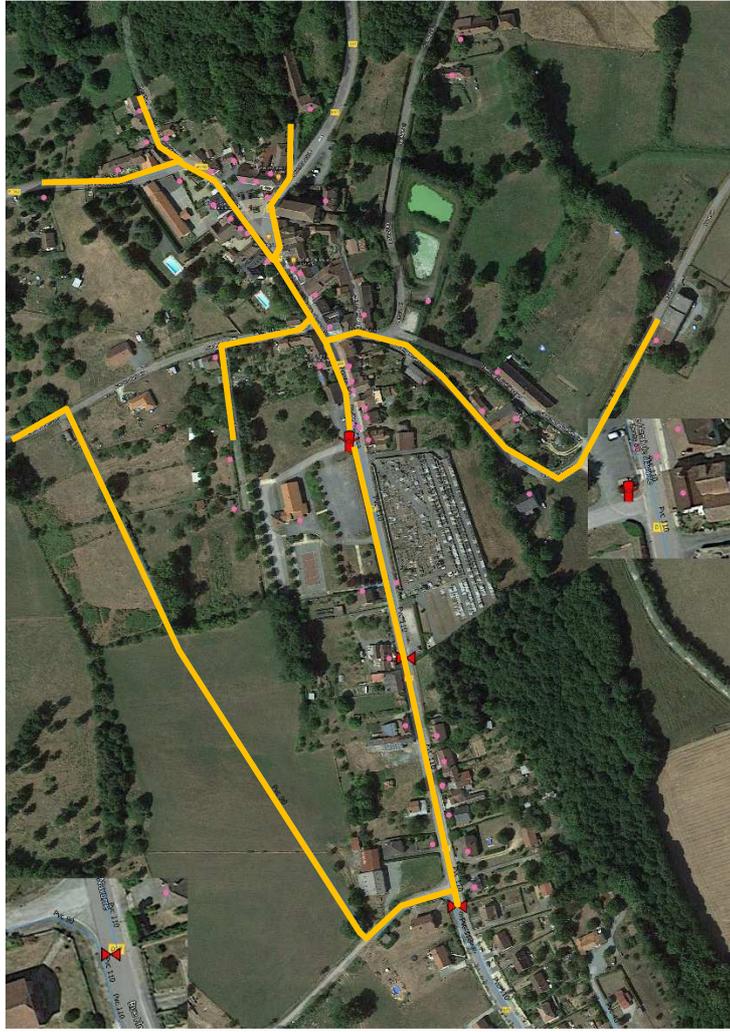


FIGURE 38 : SECTEUR "LA ROCHE L'ABEILLE"

Les tests pré expérimentaux réalisés au PI avec un débitmètre LHenry mesure les caractéristiques suivantes :

- Une pression en statique à 3.6 bars
- A P = 2.2 bars, $Q_{PI} = 13 \text{ m}^3/\text{h}$

La ligne piézométrique du secteur permet d'établir des points de mesure entre 2 et 4 bars.

SECTEUR S4 « SAINT PRIEST-LIGOURE »

Le branchement est réalisable sur PI. Trois vannes assurent l'étanchéité du secteur isolé (une seule vanne est finalement estimée étanche). Le secteur regroupe un total de **69 abonnés**, pour un linéaire d'environ **13 km**. Les canalisations sont composées d'uniquement de PVC, répartis entre PVC110 au niveau du PI et PVC90. Le linéaire important de ce secteur (comparé aux secteurs précédent) a semblé

intéressant pour une mise à l'essai car il propose un potentiel de fuite plus important, pour un nombre d'abonnés similaires à ceux de secteurs plus petits.

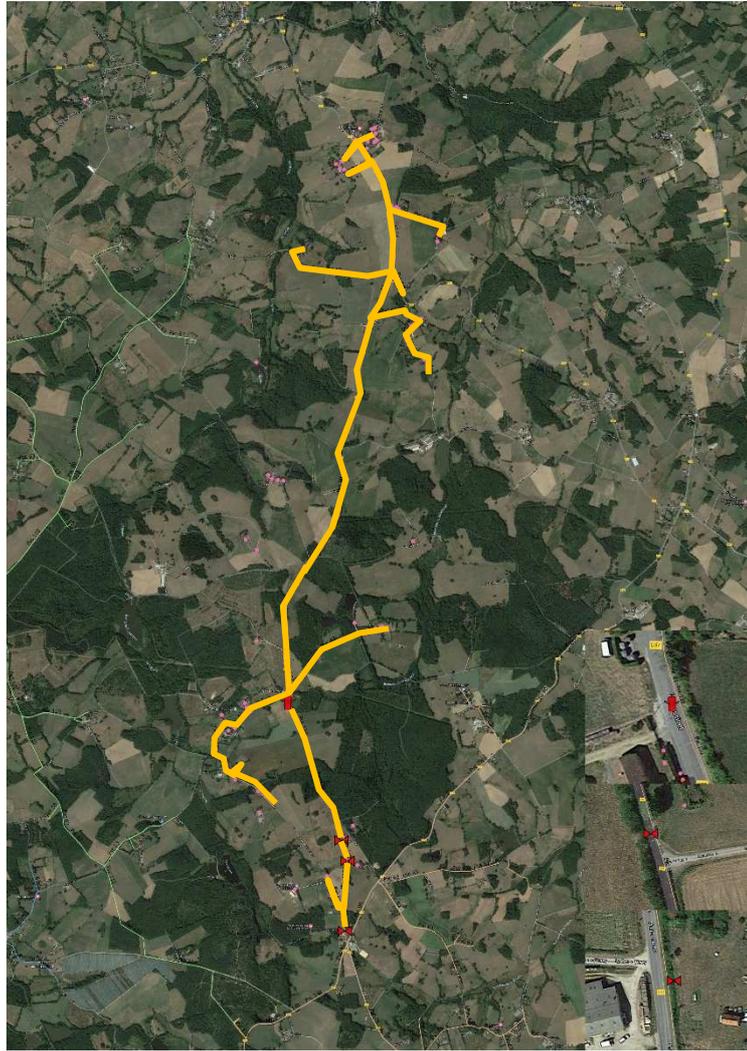


FIGURE 39 : SECTEUR "FREYSSINET"

Les tests pré expérimentaux réalisés au PI avec un débitmètre LHenry mesure les caractéristiques suivantes :

- Une pression en statique à 5.6 bars
- A P = 4 bars, $Q_{PI} = 18.5 \text{ m}^3/\text{h}$
- A P = 5 bars, $Q_{PI} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$

La ligne piézométrique du secteur permet d'établir des points de mesure à 5 bars.

SECTEUR S5 « SAINT YRIEIX AVIATEURS »

Le branchement est réalisable sur PI. La présence de deux vannes permet l'isolation du secteur complet, et six vannes additionnelles permettent le découpage de la zone en plusieurs sous-secteurs.

Le secteur regroupe un total de **47 abonnés**, pour un linéaire d'environ **2 km**. Les canalisations sont composées d'uniquement de PVC63.



FIGURE 40 : SECTEUR "SAINT YRIEIX AVIATEUR"

Les tests pré expérimentaux réalisés au PI avec un débitmètre Lhenry mesure les caractéristiques suivantes :

- Une pression en statique à 6 bars
- A P = 4 bars, $Q_{PI} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$

La ligne piézométrique du secteur permet d'établir des points de mesure à 3 bars.

1.3. TRAITEMENT ET ANALYSE DES MESURES

La campagne de mesure s'est déroulée en novembre 2022 sur une durée d'une semaine. Les mesures sont effectuées autant que possible sur des plages horaires en heures creuses (9h-11h et 14h-16h), afin d'éviter les pics de consommation. Pour chaque secteur, on retrouve :

- Le niveau d'eau de la cuve qui représente la hauteur d'eau disponible dans la cuve du dispositif de mesure mobile
- Le débit calculé à partir des données recueillies sur les débitmètres
- La pression relative mesurée en amont du poteau d'incendie

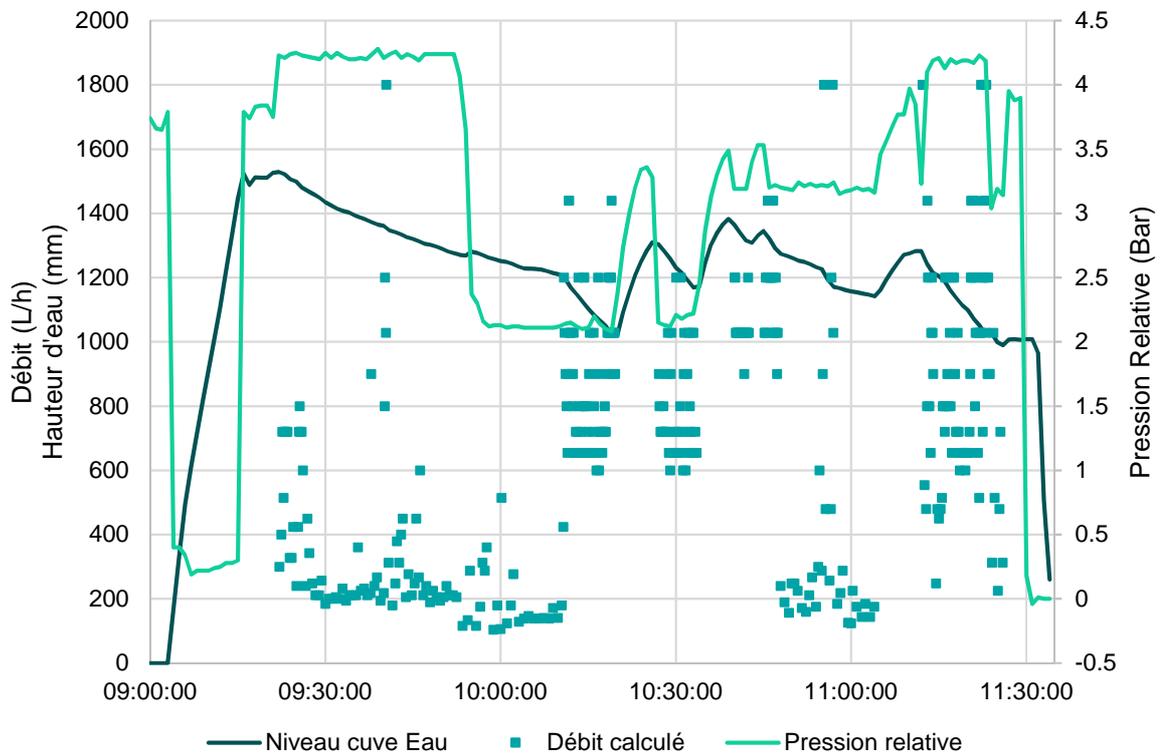


FIGURE 41 : DEBIT DE FUITE DU SECTEUR S2 GARE SUD COUSSAC

Sur la figure ci-dessus, on admet que le débit minimum mesuré sur un palier de pression stable correspond au débit de fuite du secteur. Les phases de mesure correspondent aux périodes où le niveau de cuve décroît (injection du volume d'eau dans la portion de réseau isolée). Un niveau croissant indique un arrêt temporaire de la mesure à cause d'un remplissage de la cuve.

On observe pour chaque secteur deux difficultés récurrentes, le plus souvent liées à leur dimension et leur nombre d'abonnés :

- Pour les secteurs de faible dimension (inférieure à 2 km), une probabilité plus importante de tomber sur un réseau non fuyard, rendant la mesure de débit de fuite nulle
- Pour les secteurs de dimension importante (supérieure à 5 km), une probabilité plus importante de subir le tirage d'abonné pendant la durée de mesure, empêchant la visualisation du débit de fuite

Les points de mesure M sont répertoriés dans le tableau ci-dessous, par secteur et par pression.

| Mesure | S1 | | S2 | | S3 | | S4 | | S5 | |
|--------|------|-------|------|--------|------|--------|-----|--------|------|-------|
| | P1 | Qf1 | P2 | Qf2 | P3 | Qf3 | P4 | Qf4 | P5 | Qf5 |
| M1 | 2,22 | 85,71 | 2,13 | 104,34 | 1,93 | 124,13 | 5,5 | 175,61 | 3,15 | 62,07 |
| M2 | 4,24 | 55,38 | 3,18 | 124,13 | 3,96 | 81,81 | - | - | - | - |
| M3 | - | - | 4,26 | 180 | - | - | - | - | - | - |

TABLEAU 13 : DEBIT DE FUITE MESURE SUR LES SECTEURS S1 A S5

Les secteurs S4 et S5 ont été mesuré pour deux points de pression, mais seul un point est considéré comme valide.

1.4. VALIDITE DES MESURES & COMPARAISON AU MODELE

En comparant du modèle établi d'après les résultats obtenus sur pilote, on observe le graphique ci-dessous. Les modèles affichés sont calculés pour des orifices de fuite de type A0 et A1 (circulaire, $D_{fuiteA0} = 1\text{mm}$, $D_{fuiteA1} = 2\text{mm}$), avec les coefficients d'équation d'un matériau PVC.

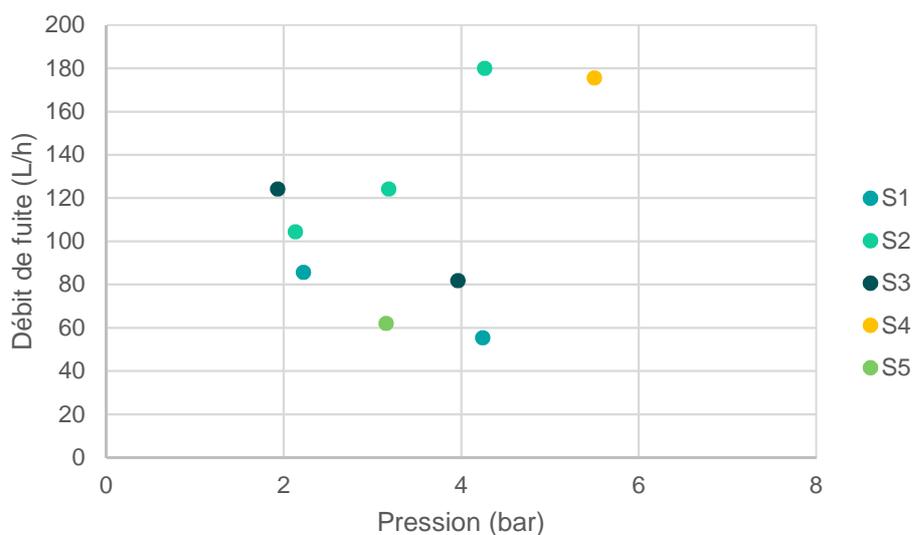


FIGURE 42 : COMPARAISON DES MESURES PAR SECTEURS

On remarque que les débits pour les secteurs S1 et S3 décroissent en fonction de la pression, indiquant des tirages d'abonnés possibles lors de la mesure de pressions plus faibles. De plus, on observe que l'augmentation du débit n'augmente pas selon une loi en racine quand la pression augmente. Il est donc difficile d'associer ces quelques points de mesure à une courbe de modèle dans ces conditions.

Pour essayer d'approcher les valeurs du débit de fuite réel du secteur, on trace une courbe de modèle par secteur, en se basant sur le débit de fuite minimum mesuré, toutes pressions confondues. Les modèles sont calés en utilisant les coefficients α et β du matériau majoritaire sur le secteur (PVC pour les 5 secteurs) et les diamètres de fuite correspondants.

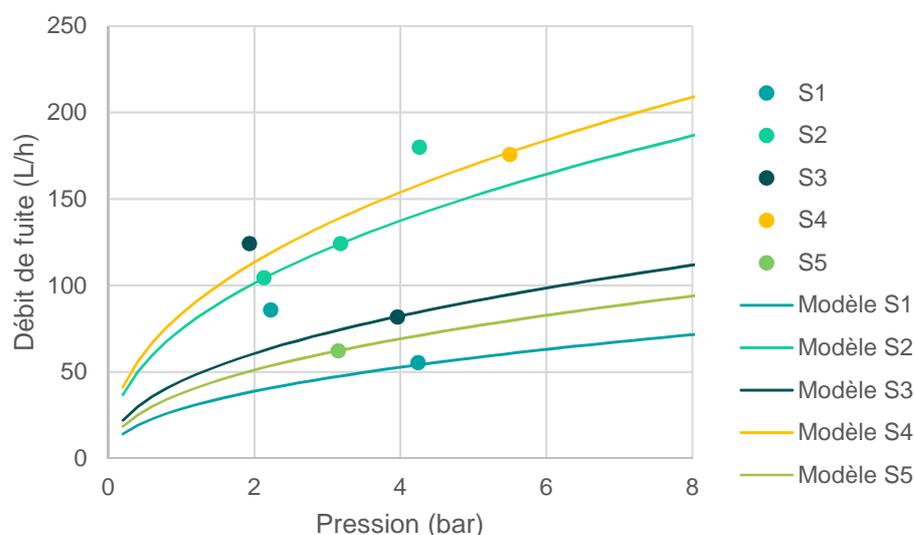


FIGURE 43 : MODELE ETABLI PAR RAPPORT AU DEBIT MINIMUM DU SECTEUR

Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques du secteur et du modèle associé, ainsi que l'estimation du débit de fuite linéaire.

| Secteur | Linéaire (km) | P statique (bar) | D _{fuite} estimé (mm ²) | Q _{fuite} estimé (L/h) | Q _{fuite} /km (L/h/km) |
|---------|---------------|------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| S1 | 1 | 3,6 | 0,96 | 50,33 | 50,33 |
| S2 | 2 | 4 | 1,55 | 137,45 | 68,73 |
| S3 | 2 | 3,8 | 1,20 | 80,54 | 40,27 |
| S4 | 13 | 5,6 | 1,64 | 178,43 | 31,86 |
| S5 | 2 | 6 | 1,10 | 82,75 | 41,38 |

TABLEAU 14: CARACTERISTIQUES DE FUITE DU SECTEUR

On remarque que :

- Les débits de fuite linéaire calculés sont compris entre 30 et 70 l/h. Ces débits sont possiblement surestimés à cause de tirages d'abonnés qui n'auraient pas pu être détectés

- Les diamètres de fuite utilisés pour caler le modèle sur les mesures sont compris entre 0,96 et 1,64 mm². Cela peut être dû à la présence d'une fuite principale, ou bien la somme de fuite de diamètre plus faible, ce que le modèle ne permet pas de différencier

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude sur pilote a permis de caractériser de manière qualitative les paramètres influant sur le débit de fuite à l'échelle d'une canalisation. A ce jour, la cinquantaine d'expérience menées sur le pilote et les traitements de données qui ont suivi ont permis de faire ressortir un modèle numérique simple, propre à chaque matériau, dépendant uniquement de la pression et l'aire de l'orifice de fuite. Ce modèle est applicable dans un milieu où le débit de fuite ne subit aucune force de pression extérieure. En effet, les expériences menées ont aussi mis en évidence le caractère instable de la matrice de sol au cours du temps, à travers trois scénarios :

- La fluidisation du milieu, où le modèle défini s'adapte correctement
- Le colmatage partiel de la fuite, où le modèle défini est surdimensionné
- Le colmatage total de la fuite, où le modèle n'a pas lieu d'être car la fuite est inexistante

La probabilité des scénarios cités ci-dessus sur un tronçons, secteurs, pourraient par la suite être étudiée afin de pouvoir prédire un modèle plus efficace et plus réaliste vis-à-vis du terrain.

Les manipulations réalisées sur le réseau de l'Office de l'Eau et sur les communes autour de Saint-Yrieix-La-Perche avec le dispositif de mesure mobile ont permis de montrer qu'il était possible de mesurer un débit de fuite directement sur le terrain, autrement qu'en passant par les données de compteur de sectorisation. En prenant en compte les précautions nécessaires à prendre à l'encontre des abonnés pour l'obtention de résultats cohérents et donc exploitables, ce dispositif pourrait à l'avenir servir à la mesure directe du débit de fuite sur les portions de réseau souhaité, notamment avec exploitant. En effet, le peu de données viables ont rendu la comparaison avec le modèle établi difficile. Cependant, une partie des données terrains pourra être utilisée pour le calcul du modèle PDM.

VII. BIBLIOGRAPHIE

- Brater, E., King, H., Lindell, J., & Wei, C. (1996). *Handbook of Hydraulics*, (7 ed.). McGraw-Hill.
- Coetzer, A., van Zyl, J., & Clayton, C. (2006). An experimental investigation into the turbulent-flow hydraulics of small circular holes in plastic pipes. In: *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, pages 1–9. American Society of Civil Engineers.
- De Marchis, M., Fontanazza, C-M., Freni, G., Notaro, V. (2014). Experimental analysis of leaks dynamic in a water distribution system. *Waterloss*.
- Deyi, M., Van zyl, J., Sheperd, M. (2014). Applying the FAVAD Concept and Leakage Number to Real Networks: A Case Study in Kwadabeka, South Africa. *Procedia Engineering*, 89:1537 – 1544.
- Farley, M., Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks: a practitioner's guide to assessment, monitoring and control*. IWA Publishing, London.
- Ferrante, M., Todini, E., Massari, C., Brunone, B., & Meniconi, S. (2012b). Experimental investigation of the leak hydraulics. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3):666–675.
- Fox, R. & McDonald, A. (1978). *Introduction to fluid mechanics*, (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Fox, S. (2016). *Understanding the Dynamic Leakage Behaviour of Longitudinal Slits in Viscoelastic Pipes.*, Thèse de doctorat, University of Sheffield.
- Husson, A., Vacelet, A., Legat, Y., Stricker, A.-E., RENAUD, E. (2020). Construction d'un dispositif permanent d'évaluation du patrimoine des réseaux d'eau potable aux échelles nationale et de bassin. Axe 1 : Approche technique. Rapport final, IRSTEA, AFB, 102.

- Jan, C. & Nguyen, Q. (2010). Discharge Coefficient for a Water Flow through a Bottom Orifice of a Conical Hopper. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(August):567–572.
- Lambert, A. (1994). Accounting for losses the bursts and background concept. *Water and Environment Journal*, p. 205-214.
- Lambert, A. (2001). What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems? In: *IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management*, pages 1–8.
- Massey, B., Ward-Smith, J. (2012). *Mechanics of Fluids*. Spon Press.
- Osterwalder, J. & Wirth, C. (1985). Experimental investigations of discharge behaviour of crack-like fractures in pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 23(3):37–41.
- Rahman, M., Biswas, R., & Mahfuz, W. (2009). Effects of Beta Ratio and Reynold's Number on Coefficient of Discharge of Orifice Meter. *Journal of Agriculture and Rural Development*, 7(June):151–156.
- Renaud, E., Pillot, J., Auckenthaler, A., Aubrun, V. (2014). Réduction des pertes d'eau des réseaux de distribution d'eau potable. ONEMA. 174 p.
- Van Zyl, J., Clayton, C. 2006. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. ResearchGate. 21 p.
- Van Zyl, J., Alsaydalani, M., Clayton, C., Bird, T., & Dennis, A. (2013). Soil fluidisation outside leaks in water distribution pipes – preliminary observations. *Water Management*, 166(WM10):546–555.

- Van Zyl, J. & Cassa, A. (2014). Modeling elastically deforming leaks in water distribution pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(2):182–189.
- Walski, T., Bezts, W., Poslusny, E., Weir, M., & Whitman, B. (2006). Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal American Water Works Association*, 98(4):147–155.
- Yoon, J., Sung, N., & Lee, C. (2008). Discharge coefficient equation of a segmental wedge flowmeter. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 222(1):79–83.

ANNEXES

ANNEXE 1 : GAMME DES DN PEHD

| ∅ | Epaisseur (mm) | PN | Poids (Kg/m) |
|-----|----------------|------|--------------|
| 40 | 3,0 | 12,5 | 0,279 |
| 50 | 3,7 | 12,5 | 0,428 |
| | 4,6 | 16 | 0,428 |
| 63 | 4,7 | 12,5 | 0,790 |
| | 5,8 | 16 | 1,050 |
| 75 | 5,6 | 12,5 | 1,260 |
| | 6,8 | 16 | 1,470 |
| 90 | 6,7 | 12,5 | 1,770 |
| | 8,2 | 16 | 1,770 |
| 110 | 8,1 | 12,5 | 2,150 |
| | 10,0 | 16 | 2,650 |
| 125 | 9,2 | 12,5 | 3,190 |
| | 11,4 | 16 | 3,410 |
| 140 | 10,3 | 12,5 | 4,130 |
| | 12,7 | 16 | 4,270 |
| 160 | 9,5 | 10 | 5,150 |
| | 11,8 | 12,5 | 4,570 |
| | 14,6 | 16 | 5,600 |
| 180 | 13,3 | 12,5 | 6,750 |
| | 16,4 | 16 | 7,100 |
| 200 | 14,7 | 12,5 | 8,700 |
| | 18,2 | 16 | 10,600 |

ANNEXE 2 : GAMME DES DN PVC PN10 & PN16

| Ø | Epaisseur (mm) | Poids (Kg/m) |
|-----|----------------|--------------|
| 63 | 3,0 | |
| | 4,7 | 1,400 |
| 75 | 3,6 | |
| | 5,6 | 1,900 |
| 90 | 4,3 | 1,900 |
| | 6,7 | 2,700 |
| 110 | 5,3 | 2,800 |
| | 8,1 | 4,000 |
| 125 | 6,0 | 3,500 |
| | 9,2 | 5,200 |
| 140 | 6,1 | 4,000 |
| | 9,3 | 6,000 |
| 160 | 6,2 | 4,700 |
| | 9,5 | 7,000 |
| 200 | 7,7 | 7,300 |
| | 11,9 | 11,000 |
| 225 | 8,6 | 9,100 |
| | 13,4 | 13,700 |
| 250 | 9,6 | 11,300 |
| | 14,8 | 16,800 |
| 315 | 12,1 | 17,800 |
| | 18,7 | 26,200 |

ANNEXE 3 : GAMME DES DN FONTE

| DN | DE (mm) | DB (mm) |
|-----|---------|---------|
| 100 | 118 | 189 |
| 150 | 170 | 243 |
| 200 | 222 | 296 |
| 250 | 274 | 353 |
| 300 | 326 | 410 |
| 400 | 429 | 517 |
| 500 | 532 | 630 |

ANNEXE 4 : RECAPITULATIF DES EXPERIENCES MENEES SUR CS

| Dénomination | Date | Durée (j) | Caisson | Matériau | DN e | Øfuite | Température | Présence nappe |
|------------------------|---------------------|-----------|---------|----------|------|--------|-------------|----------------|
| S101 [PVC 125 10 Ø2] | 11/07/19-26/07/19 | 15 | Sol | PVC | 125 | 2 | 10 | - |
| S102 [PVC 125 10 Ø2] | 20/08/19-24/08/19 | 5 | Sol | PVC | 125 | 2 | 10 | - |
| S103 [PVC 125 10 Ø2] | 29/08/19-26/09/19 | 29 | Sol | PVC | 125 | 2 | 10 | - |
| S104 [PVC* 125 10 Ø2] | 30/09/19-08/10/19 | 9 | Sol | PVC | 125 | 2 | 10 | ✓ |
| S105 [PVC 63 30 Ø4] | 24/06/21-27/07/21 | 33 | Sol | PVC | 63 | 4 | 30 | - |
| S106 [PVC 63 30 Ø4] | 10/08/21-27/08/21 | 17 | Sol | PVC | 63 | 4 | 30 | - |
| S107 [PVC 63 10 Ø4] | 21/12/21 - 14/01/22 | 25 | Sol | PVC | 63 | 4 | 20 | - |
| S201 [FNT 100 10 Ø2] | 06/04/20 - 13/05/20 | 40 | Sol | Fonte | 100 | 2 | 10 | - |
| S202 [FNT 100 20 Ø2] | 13/05/20 - 07/07/20 | 56 | Sol | Fonte | 100 | 2 | 20 | - |
| S301 [PEHD 125 10 Ø4] | 10/09/20 - 30/09/20 | 20 | Sol | PEHD | 125 | 4 | 10 | - |
| S302 [PEHD* 125 20 Ø4] | 11/11/20 - 01/12/20 | 20 | Sol | PEHD | 125 | 4 | 20 | ✓ |
| S303 [PEHD 125 30 Ø4] | 30/09/20 - 27/10/20 | 28 | Sol | PEHD | 125 | 4 | 30 | - |
| S304 [PEHD 63 20 Ø4] | 16/03/21 - 03/05/21 | 49 | Sol | PEHD | 63 | 4 | 20 | - |

ANNEXE 5 : RECAPITULATIF DES EXPERIENCES MENEES SUR CE

| Dénomination | Date | Durée (j) | Caisson | Matériau | DN e | Øfuite | Température | Présence nappe |
|-----------------------|---------------------|-----------|---------|----------|------|--------|-------------|----------------|
| E101 [PVC 125 10 Ø2] | 27/09/19-27/09/19 | 1 | Eau | PVC | 125 | 2 | 10 | |
| E102 [PVC 125 20 Ø2] | 15/10/19-25/10/19 | 11 | Eau | PVC | 125 | 2 | 20 | |
| E103 [PVC 125 30 Ø2] | 25/10/19-31/10/19 | 7 | Eau | PVC | 125 | 2 | 30 | |
| E104 [PVC 125 30 Ø2] | 31/10/19-03/11/19 | 4 | Eau | PVC | 125 | 2 | 30 | |
| E105 [PVC 125 30 Ø2] | 07/11/19-07/11/19 | 1 | Eau | PVC | 125 | 2 | 30 | |
| E106 [PVC 63 15 Ø2] | 27/02/21-07/03/21 | 10 | Eau | PVC | 63 | 2 | 15 | |
| E107 [PVC 63 20 Ø2] | 02/12/20-11/12/20 | 9 | Eau | PVC | 63 | 2 | 20 | |
| E108 [PVC 63 30 Ø2] | 17/02/21-27/02/21 | 10 | Eau | PVC | 63 | 2 | 30 | |
| E109 [PVC 125 10 Ø2] | 19/11/21-22/11/21 | 4 | Eau | PVC | 125 | 2 | 10 | |
| E110 [PVC 125 20 Ø2] | 22/11/21-25/11/21 | 4 | Eau | PVC | 125 | 2 | 20 | |
| E111 [PVC 125 10 Ø4] | 26/11/21-29/11/21 | 4 | Eau | PVC | 125 | 4 | 10 | |
| E112 [PVC 125 20 Ø4] | 29/11/21-01/12/21 | 3 | Eau | PVC | 125 | 4 | 20 | |
| E113 [PVC 125 30 Ø4] | 02/12/21-04/12/21 | 3 | Eau | PVC | 125 | 4 | 30 | |
| E201 [FNT 100 10 Ø2] | 07/12/19 - 11/12/19 | 5 | Eau | Fonte | 100 | 2 | 10 | |
| E202 [FNT 100 20 Ø2] | 21/11/19 - 25/11/19 | 3 | Eau | Fonte | 100 | 2 | 20 | |
| E203 [FNT 100 30 Ø2] | 27/11/19 - 02/12/19 | 2 | Eau | Fonte | 100 | 2 | 30 | |
| E204 [FNT 100 10 Ø4] | 18/02/20 - 29/02/20 | 11 | Eau | Fonte | 100 | 4 | 10 | |
| E205 [FNT 60 30 Ø2] | 27/09/21 - 05/10/21 | 9 | Eau | Fonte | 60 | 2 | 30 | |
| E206 [FNT 60 30 Ø2] | 09/12/21 - 11/12/21 | 3 | Eau | Fonte | 60 | 2 | 30 | |
| E207 [FNT 60 20 Ø2] | 11/12/21 - 12/12/21 | 2 | Eau | Fonte | 60 | 2 | 20 | |
| E208 [FNT 60 10 Ø2] | 12/12/21 - 13/12/21 | 2 | Eau | Fonte | 60 | 2 | 10 | |
| E209 [FNT 60 10 Ø4] | 14/12/21 - 15/12/21 | 2 | Eau | Fonte | 60 | 4 | 10 | |
| E210 [FNT 60 20 Ø4] | 16/12/21 - 17/12/21 | 2 | Eau | Fonte | 60 | 4 | 20 | |
| E211 [FNT 60 30 Ø4] | 17/12/21 - 20/12/21 | 4 | Eau | Fonte | 60 | 4 | 30 | |
| E301 [PEHD 125 10 Ø2] | 25/07/20 - 13/08/20 | 21 | Eau | PEHD | 125 | 2 | 10 | |
| E302 [PEHD 125 20 Ø2] | 08/07/20 - 25/07/20 | 17 | Eau | PEHD | 125 | 2 | 20 | |
| E303 [PEHD 125 30 Ø2] | 13/08/20 - 26/08/20 | 11 | Eau | PEHD | 125 | 2 | 30 | |
| E304 [PEHD 125 30 Ø4] | 01/11/20 - 11/11/20 | 28 | Eau | PEHD | 125 | 4 | 30 | |
| E305 [PEHD 63 10 Ø2] | 14/12/20 - 20/01/21 | 38 | Eau | PEHD | 63 | 2 | 10 | |
| E306 [PEHD 63 10 Ø4] | 21/01/21 - 08/02/21 | 17 | Eau | PEHD | 63 | 4 | 10 | |
| E307 [PEHD 63 30 Ø4] | 09/02/21 - 15/02/21 | 6 | Eau | PEHD | 63 | 4 | 30 | |
| E308 [PEHD 125 20 Ø2] | 04/11/21 - 06/11/21 | 2 | Eau | PEHD | 125 | 2 | 20 | |
| E309 [PEHD 125 30 Ø2] | 08/11/21 - 10/11/21 | 2 | Eau | PEHD | 125 | 2 | 30 | |
| E310 [PEHD 125 20 Ø4] | 15/11/21 - 18/11/21 | 3 | Eau | PEHD | 125 | 4 | 20 | |
| E311 [PEHD 125 30 Ø4] | 10/11/21 - 13/11/21 | 3 | Eau | PEHD | 125 | 4 | 30 | |
| E312 [PEHD 63 10 Ø2] | 15/01/22 - 17/01/22 | 3 | Eau | PEHD | 63 | 2 | 10 | |
| E313 [PEHD 63 20 Ø2] | 17/01/22 - 19/01/22 | 3 | Eau | PEHD | 63 | 2 | 20 | |
| E314 [PEHD 63 30 Ø2] | 20/01/22 - 23/01/22 | 4 | Eau | PEHD | 63 | 2 | 30 | |

ANNEXE 6 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU MATERIAU DE REMBLAIEMENT CS

GNTB

Producteur : GSM AQUITAINE - ILLATS Utilisateur : INTERNE
 Pétrographie : ALLUVIONNAIRE SILICEUX
 Elaboration : CONCASSE

Partie normative

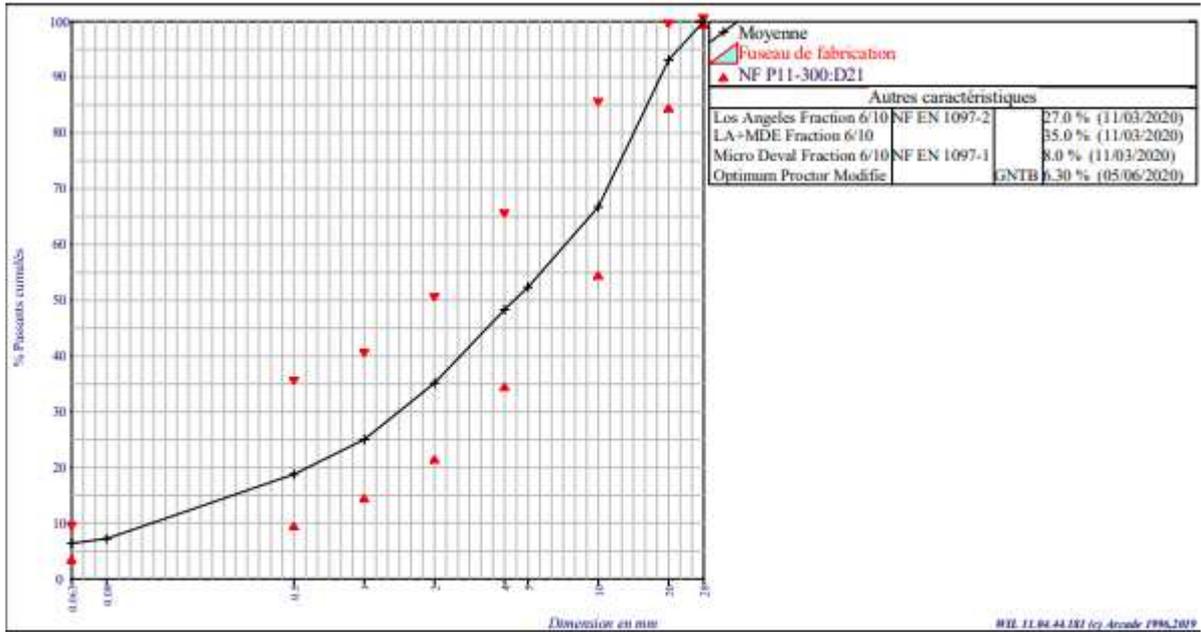
Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| Classe granulaire | Norme | Catégorie |
| 0 20 | Norme NF P11-300 Matériaux pour remblais et couches de forme | D21 |

| | 0.063 | 0.08 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 5 | 10 | 20 | 28 | SE(10) | W | VB5 | VBS |
|--------|-------|------|-----|----|----|----|---|----|----|-----|--------|---|-----|-----|
| V.S.S. | 9.0 | | 35 | 40 | 50 | 65 | | 85 | 99 | 100 | | | | |
| V.S.L. | 4.0 | | 10 | 15 | 22 | 35 | | 55 | 85 | 100 | 35 | | | |

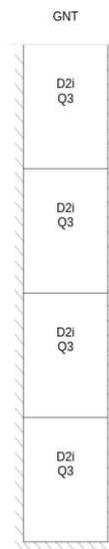
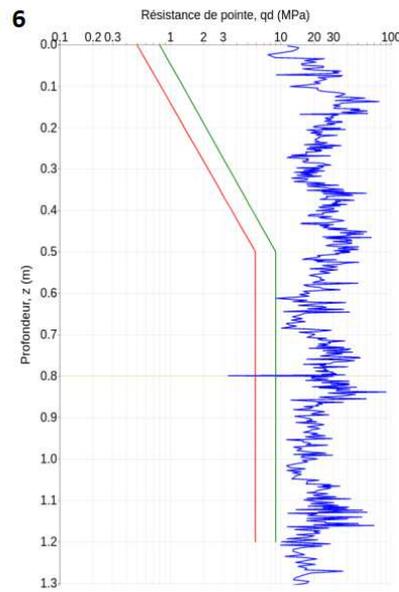
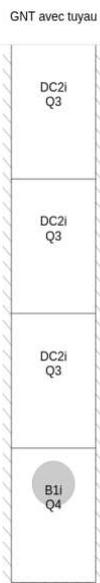
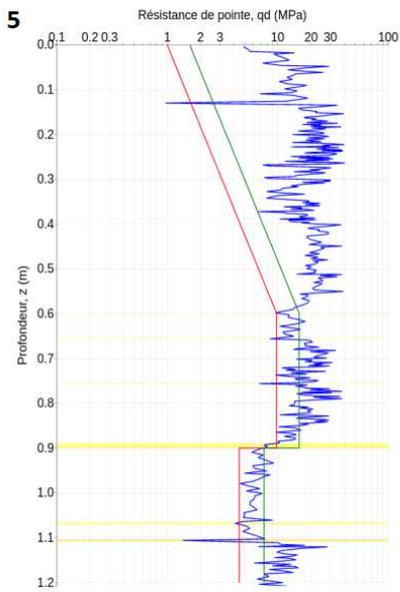
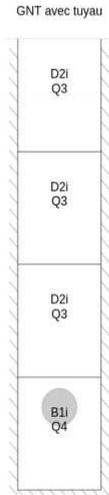
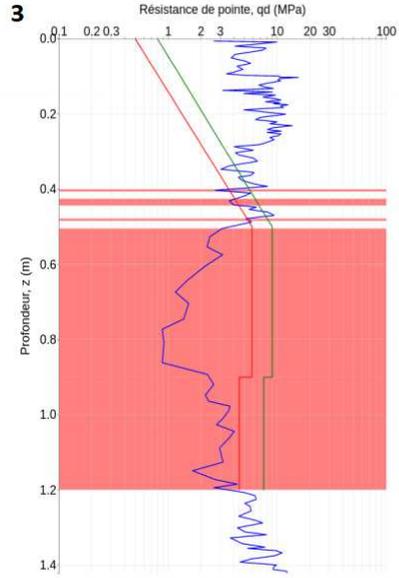
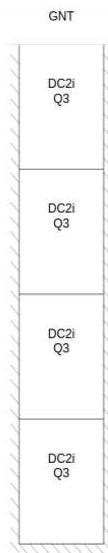
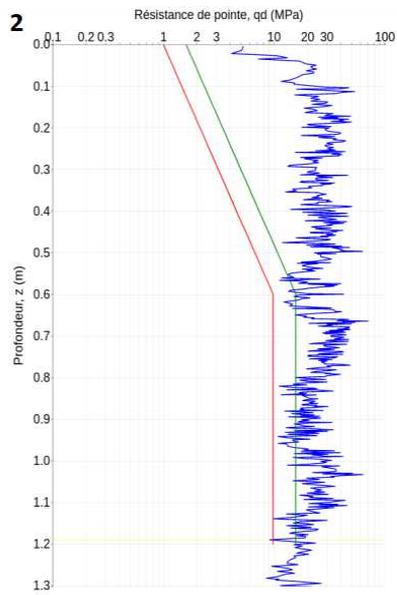
Partie informative
 Résultats de production

| du 07/01/20 au 29/06/20 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|--------|-----|------|------|
| | 0.063 | 0.08 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 5 | 10 | 20 | 28 | SE(10) | W | VB5 | VBS |
| Maximum | 7.4 | 8.1 | 23 | 31 | 42 | 57 | 61 | 74 | 96 | 100 | 56 | 9.2 | 1.00 | 0.06 |
| Moyenne Xf | 6.4 | 7.2 | 19 | 25 | 35 | 48 | 52 | 67 | 93 | 100 | 46 | 6.3 | 1.00 | 0.05 |
| Minimum | 5.4 | 5.6 | 13 | 18 | 26 | 39 | 42 | 58 | 91 | 100 | 38 | 4.6 | 1.00 | 0.04 |



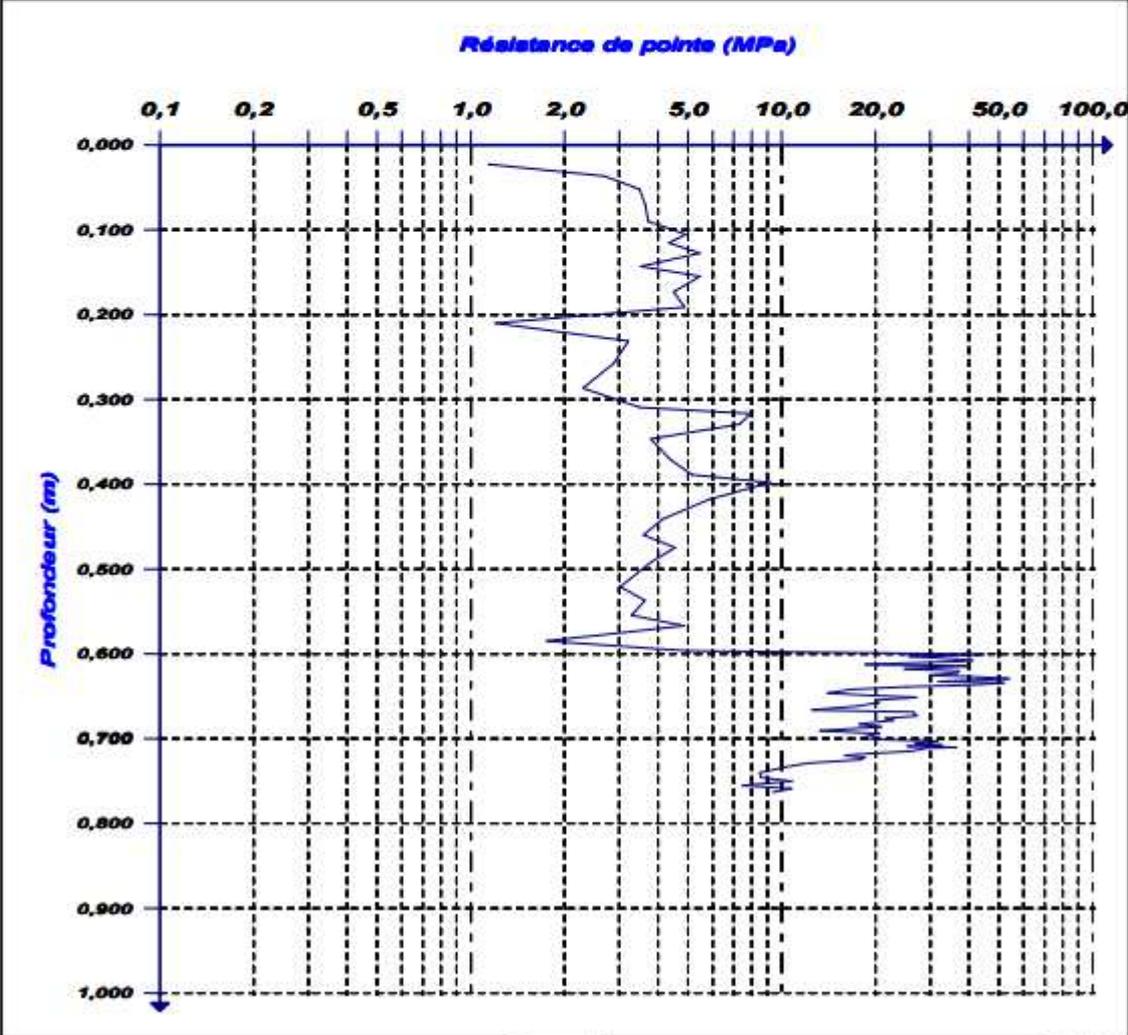
R. POIRIER

ANNEXE 7 : ESSAI DE COMPACTAGE AU PENETROMETRE DYNAMIQUE EN CS



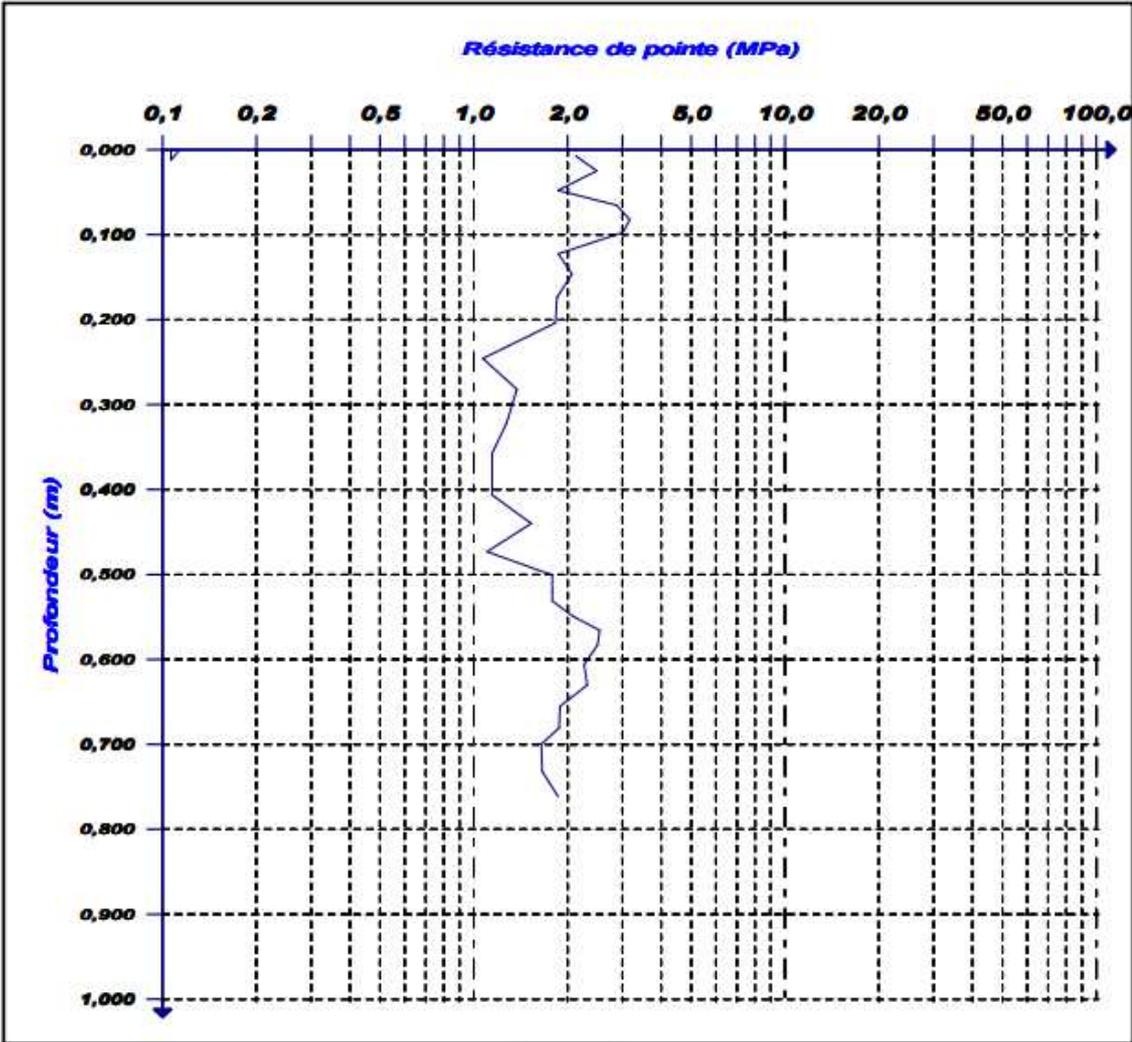
Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable

| | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Document : | | | |
| Site : roc | | | |
| Sondage : Sondage n°3 | | | |
| Enrobé : 0,00 m | Prof. pré-forage : 0,000 m | Section : 2 cm ² | Prof. nappe : Indéterminée |
| Masse : Marteau Panda 2 | Cond. d'arrêt : Temporaire | Date : 18/02/2021 | Heure : 15:29:00 |
| Opérateur : A | | Organisme : | |
| Commentaires : | | | |



**Contrôle de compactage au pénétromètre
dynamique à énergie variable**

| | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Document : D:\RocData\OIEau\test1.pd2 | | | |
| Site : roc | | | |
| Sondage : Sondage n°4 | | | |
| Enrobé : 0,00 m | Prof. pré-forage : 0,000 m | Section : 2 cm ² | Prof. nappe : Indéterminée |
| Masse : Marteau Panda 2 | Cond. d'arrêt : Temporaire | Date : 18/02/2021 | Heure : 18:01:00 |
| Opérateur : C | | Organisme : | |
| Commentaires : | | | |



Contrôle de compactage au pénétromètre dynamique à énergie variable

| | | | |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Document : | | | |
| Site : roc | | | |
| Sondage : Sondage n°2 | | | |
| Enrobé : 0.00 m | Prof. pré-forage : 0.000 m | Section : 2 cm ² | Prof. nappe : Indéterminée |
| Masse : Marteau Panda 2 | Cond. d'arrêt : Temporaire | Date : 18/02/2021 | Heure : 15:24:00 |
| Opérateur : Z | | Organisme : | |
| Commentaires : | | | |

