

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Eric BLACKBURN

ANALYSE PAR UTILISATION DE L'OXYGÈNE DE DIFFÉRENTES
CONFIGURATIONS D'UN PILOTE CIBLANT LA DIFFUSION D'UN GAZ DANS
L'EAU

MONTREAL, LE 17 MARS 2014

©Tous droits réservés, Eric Blackburn, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monet, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Marco Tremblay, examinateur externe
Imalog inc.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 14 FÉVRIER 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie mon directeur de recherche M. Robert Hausler qui en initiant ce projet m'a donné confiance et m'a permis de réaliser ce besoin qui apparaît au fil d'une formation scientifique de mener son propre projet de recherche.

Merci également à la compagnie Imalog inc., son président M. Antonio Di Schiavi et son directeur de la recherche M. Marco Tremblay pour leur confiance et leur appui. Vous m'avez accueilli dans vos locaux avec chaleur, m'avez toujours soutenu de près ou de loin avec une attitude exemplaire, sans pression indue basée sur une vision et une philosophie d'entreprise très humaine pour lesquels je conserve un profond respect.

Ensuite, j'aimerais remercier les organismes subventionnaires que sont le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et leurs représentants pour l'octroi de ma bourse en milieu pratique BMP-innovation. Je remercie ainsi chaque citoyen québécois et canadien pour ce soutien indirect.

Merci à toute l'équipe de la STEPPE et à ceux qui ont parcouru ce bout de chemin avec moi. Un environnement de travail aussi dynamique favorise la motivation, les discussions, les belles rencontres et offre de l'aide précieuse.

Une profonde reconnaissance à mes parents Lise et Alain; voici l'accomplissement d'un long parcours formatif, ardu et à certains égards, non conventionnel. Vous m'avez offert un luxe immense; le choix de le mener suivant ma volonté propre grâce à un support, une générosité et un amour sans borne. Je porte votre force et j'ai bien l'intention de la transmettre. Vous demeurez à mon avis des parents d'exception. Un petit mot à mon frère Pierre que j'aime, il est fascinant de constater que ton parcours est tout aussi non conventionnel que le mien, mais que comme des frères, l'un ne va pas sans l'autre.

VI

Je remercie également mon ami Pierre Blanchard, ta force de caractère et ton courage indéniable sont une source d'inspiration. Je vais m'assurer de protéger et de valoriser le génie de ton travail à caractère environnemental de la même façon dont tu as valorisé avec grande humanité, étant donné ta situation de santé précaire, que je termine d'abord et avant tout mon projet de maîtrise.

Un grand merci à mes beaux-parents Pierrette et Roger pour votre assistance dans les dernières semaines de ma rédaction en vous occupant de votre petite-fille (vacances de garderie). Autrement je n'aurais pu maintenir un rythme effréné pour compléter dans les temps le document.

À mon amour Myriam pour qui j'ai une profonde reconnaissance. Dans la dernière année et demie, tu as assumé la grande majorité du coût de la vie pour notre famille; et de facto, la réussite de ce projet. En effet, grâce à ta compréhension et à ton support extraordinaire, j'ai pu poursuivre à temps plein mon travail malgré l'absence de revenus, ce qui sans ta présence, aurait été impossible. Ce projet a donc une part de toi alors que tu en as subi les effets collatéraux et l'externalisation des coûts. Je t'aime et je me promets de t'offrir dans un avenir rapproché une opportunité similaire.

Finalement, à ma fille Magalie, née il y a de cela un peu plus d'un an; et à ta petite sœur actuellement en route. Ce projet représente un certain accomplissement pour votre père comme scientifique. Pourtant, il n'est rien en comparaison du bonheur ressenti lorsque le son «Papa!» parvient à ses oreilles. Mais il n'en demeure pas moins une chose, nous avons du pain sur la planche pour que vous puissiez vivre dans le meilleur environnement qui soit...

ANALYSE PAR UTILISATION DE L'OXYGÈNE DE DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS D'UN PILOTE CIBLANT LA DIFFUSION D'UN GAZ DANS L'EAU

Eric BLACKBURN

RÉSUMÉ

Il existe une multiplicité de système pour dissoudre un gaz suivant un objectif de traitement de contaminants dans l'eau. La finalité de ce travail est de développer une technologie de référence. L'objectif principal est de valider empiriquement l'intérêt technique de travailler sur la zone de diffusion du gaz dans l'eau. Pour ce faire, un pilote est construit et calibré. Une configuration de base du pilote est définie, le mode jet libre. Ensuite, différentes configurations (mode buse, mode mélangeurs statiques, mode avec anneaux de Rachig, mode LTCP) modifiant un aspect de diffusion du mode jet libre sont testées. L'oxygène est le gaz utilisé pour les essais de réoxygénation de l'eau suivant différents ratio G/L (v/v). Le sulfite de sodium est utilisé pour la désoxygénation et le suivi d'un traceur. Une caméra à capture rapide sert à la mesure de paramètres concernant les bulles de gaz. Il faut retenir principalement que l'augmentation du ratio G/L dans le mode jet libre augmente la capacité à oxygéner. En contrepartie, l'efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajouté par litre d'eau traité diminue. La taille moyenne des bulles observées augmente avec le ratio G/L tout autant que leur irrégularité de forme. Pour une première étape de réoxygénation de l'eau d'essai à un ratio G/L de 0,08, la capacité à dissoudre par rapport à celle du bruit de fond montre que le mode jet libre est $(19,0 \pm 0,5)$ % plus performant suivi par le mode jet libre avec restriction sur le débit d'eau à (22 ± 2) %. L'ajout d'une buse fait passer ce pourcentage à (26 ± 1) % et l'ajout de mélangeurs statiques à (31 ± 2) %. Le mode avec anneaux de Rachig produit l'effet inverse et abaisse le pourcentage à (15 ± 2) % alors que le fait de raccourcir la zone de contact primaire (mode LTCP) maintient une performance autour de (18 ± 3) %. Autre observation pour cette même étape, l'efficacité de transfert de l'oxygène ajouté par litre d'eau traitée est de (7 ± 3) % pour le mode jet libre, de (16 ± 2) % pour le mode jet libre avec restriction, de (19 ± 1) % pour le mode buse, (23 ± 1) % pour le mode avec mélangeurs statiques, (11 ± 2) % pour le mode anneaux de Rachig et (13 ± 2) % pour le mode LTCP. Les essais de suivi d'un traceur montrent que le mode buse et celui des mélangeurs statiques favorisent le mélange et la capacité à interagir. Ces deux modes témoignent aussi de l'intérêt à distribuer uniformément la pression d'eau le long du circuit et d'augmenter la pression du gaz. Bref, il faut poursuivre le travail sur la zone de diffusion du gaz alors que la performance doit être évaluée suivant la combinaison optimale de multiples critères. Il est suggéré de tester le fait d'allonger la zone de contact primaire du pilote, de mesurer l'effet combiné de la buse et des mélangeurs statiques et de vérifier l'utilité de l'injecteur venturi lorsque le gaz est injecté sous pression. Le cas des anneaux de Rachig est à approfondir suivant l'hypothèse de rétention de l'oxygène à la surface des plaques tout autant que le travail amorcé à l'aide de la caméra à capture rapide comme outils de mesure de la distribution et de la taille des bulles dans la zone de contact secondaire.

Mots-clés : Oxygène, traitement de l'eau, diffusion d'un gaz, dissolution d'un gaz

ANALYSIS BY USING OXYGEN OF DIFFERENT PATTERNS OF A PILOT TARGETING THE RELEASE OF A GAS IN WATER

Eric BLACKBURN

ABSTRACT

There is a plurality of system for dissolving a gas in a goal of water treatment. The purpose of this work is to develop a reference technology. The main objective is to empirically validate the technical interest to work on the area of diffusion of the gas in water. To do this, a pilot is built and calibrated. A basic configuration of the pilot is set, the free jet mode. Then different configurations (nozzle mode, static mixers mode, Rachig rings mode, LTCP mode) changing a diffusion aspect of the free jet mode are tested. The oxygen gas is used for testing the water reoxygenation at different G/L (v/v) ratio. The sodium sulfite is used for deoxygenation and the monitoring of a tracer. A fast capture camera served the measurement of parameters on the gas bubbles. It should be noted that the increase of the G/L ratio in the free jet mode increases the ability to oxygenate. In return, the transfer efficiency of the oxygen mass added per liter of treated water decreases. The average size of bubbles observed as well as their shape irregularity step up as the G/L ratio increase. At a first step of reoxygenation of the test water at $G/L = 0.08$, the ability to dissolve compared to the background noise indicates that the free jet mode is (19.0 ± 0.5) % more effective followed at (22 ± 2) % by the free jet mode with a restriction on water flow. Adding a nozzle makes that percentage passed to (26 ± 1) % and the addition of static mixers to (31 ± 2) %. Mode with Rachig rings has the opposite effect and lowers the percentage to (15 ± 2) % while shortening the primary contact area (LTCP mode) maintains a performance around (18 ± 3) %. Another observation at that step, the transfer efficiency of oxygen added per liter of treated water is of (7 ± 3) % for the free jet mode, of (16 ± 2) % in the free jet mode with restriction, of (19 ± 1) % for the nozzle mode, (23 ± 1) % for the mode with static mixers, (11 ± 2) % for Rachig rings mode and (13 ± 2) % for LTCP mode. The tracer monitoring indicates that the nozzle and the static mixers promote mixing and the ability to interact. These two modes also point the interest to evenly distribute the water pressure along the circuit and increase the gas pressure. Then we must continue to work on the diffusion area of the gas while performance must be evaluated according to an optimal combination of multiple criteria. It is suggested to test extend of the primary contact zone of the pilot, to measure the combined effect of the nozzle and the static mixers and to verify the usefulness of the venturi injector as the gas is injected under pressure. The case of the Rachig rings should be further on the assumption of oxygen retention in the surface of the plates as well as the work started using the fast capture camera as a tool for measuring the distribution and the bubble size.

Keys words: Oxygen, water treatment, gas diffusion, gas dissolution

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES..... | 1 |
| 1.1 Revue de littérature..... | 1 |
| 1.2 Cadre théorique..... | 3 |
| CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET HYPOTHÈSE DE RECHERCHE..... | 7 |
| CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE..... | 9 |
| 3.1 Conception et principe de fonctionnement du pilote | 9 |
| 3.2 Plan d'expérimentation | 21 |
| 3.3 Approche expérimentale..... | 23 |
| 3.4 Courbe corrective du taux d'oxygène mesuré en raison de la variation de la température de l'eau | 26 |
| 3.5 Intégration de la caméra haute-vitesse comme méthode de mesure | 27 |
| CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSE | 31 |
| 4.1 Caractéristiques physiques..... | 31 |
| 4.2 Capacité à oxygéner..... | 43 |
| 4.3 Validation des résultats..... | 69 |
| 4.4 Capacité à interagir | 78 |
| CHAPITRE 5 DISCUSSION..... | 91 |
| CONCLUSION..... | 101 |
| ANNEXE I DONNÉES BRUTES POUR L'ÉTALONNAGES DES MANOMÈTRES | 103 |
| ANNEXE II ÉTALONNAGE DU DÉBITMÈTRE POUR L'EAU..... | 104 |
| ANNEXE III MÉTHODE D'ÉTALONNAGE DES DÉBITMÈTRES POUR LE GAZ..... | 107 |
| ANNEXE IV NOTES SUR LA MÉTHODE DE DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU . | 121 |
| ANNEXE V MESURES DE CORRECTION DU TAUX D'OXYGÈNE EN RAISON DE LA VARIATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU. | 124 |
| ANNEXE VI PROTOCOLE TYPIQUE D'UNE JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION..... | 131 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| I. | Préparation du pilote | 131 |
| II. | Mesure du blanc (procédure de base) | 134 |
| III. | Mesure du temps de résidence | 148 |
| IV. | Mesure du zéro..... | 162 |
| V. | Mesure de la réoxygénation..... | 172 |
| ANNEXE VII | TRAITEMENT GRAPHIQUE DES PHOTOS..... | 185 |
| ANNEXE VIII | SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS..... | 187 |
| ANNEXE IX | CARACTÉRISTIQUES DE L'EAU D'ESSAI..... | 199 |
| ANNEXE X | MÉTHODE DE CALCUL POUR ÉVALUER LA CONTRIBUTION DU BRUIT DE FOND À CHAQUE UNITÉ DE TRAITEMENT | 203 |
| ANNEXE XI | COURBES EXPÉRIMENTALES DU SIGNAL ENGENDRÉ PAR LE PASSAGE DU TRACEUR..... | 205 |
| ANNEXE XII | GLOSSAIRE..... | 212 |
| | LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 221 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|-------------|--|
| Tableau 3.1 | Caractéristiques techniques associées à l'utilisation du pilote lors des expérimentations.....12 |
| Tableau 3.2 | Configuration interne de la caméra pour les photos de type.....29 |
| Tableau 4.1 | Temps d'essai calculé pour un volume fixé de 300 L d'eau et un ratio G/L de 0,08.....33 |
| Tableau 4.2 | Temps d'expérience cumulé pour ramener à saturation un volume de 300 L d'eau à un ratio G/L de 0,08.....52 |
| Tableau 4.3 | Ordre qualitatif de performance des différents modes du pilote pour un ratio G/L de 0,08 par rapport à leur capacité à dissoudre.....53 |
| Tableau 4.4 | Ordre qualitatif de performance des différents modes du pilote pour un ratio G/L de 0,08 par rapport à leur capacité à saturer.....58 |
| Tableau 4.5 | Gain en performance de chaque mode par rapport au bruit de fond pour un premier traitement de réoxygénation à G/L = 0,08.....60 |
| Tableau 4.6 | Performance en efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajouté par litre d'eau pour un premier traitement pour un ratio G/L de 0,08.....66 |
| Tableau 4.7 | Synthèse des performances qualitatives des différents modes l'un par rapport à l'autre pour un ratio G/L de 0,08 suivant de multiples critères..68 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|-------------|---|------|
| Figure 3.1 | Schématisation du pilote..... | 9 |
| Figure 3.2 | Aspect général du pilote..... | 10 |
| Figure 3.7 | Schématisation d'une photo de type «Panache de bulle»..... | 27 |
| Figure 3.8 | Schématisation d'une photo de type «Taille de bulle»..... | 28 |
| Figure 4.1 | Débits d'eau, de gaz et ratio G/L (v/v) expérimentaux | 31 |
| Figure 4.2 | Distribution de la pression le long du circuit d'eau et pressions de gaz mesurés | 34 |
| Figure 4.3 | Désoxygénation de l'eau d'essai initial..... | 38 |
| Figure 4.4 | Taille moyenne des bulles observées en mode jet libre suivant l'augmentation du ratio G/L..... | 40 |
| Figure 4.5 | Photo de type «Panache de bulle» tiré de l'expérience #6..... | 41 |
| Figure 4.6 | Photo de type «Taille de bulle» tiré de l'expérience #6..... | 41 |
| Figure 4.7 | Fraction recouverte à chaque traitement de la quantité d'oxygène retirée initialement | 44 |
| Figure 4.8 | Fraction recouverte à chaque traitement de l'oxygène retiré restant..... | 47 |
| Figure 4.9 | Fraction recouverte cumulée de l'oxygène initialement retiré | 49 |
| Figure 4.10 | Travail supplémentaire accompli par rapport au bruit de fond après chaque traitement successif..... | 59 |
| Figure 4.11 | Évolution de l'efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajouté en éliminant l'apport du bruit de fond à traitement équivalent | 62 |
| Figure 4.12 | Analyse sommaire de l'erreur sur la fraction recouverte cumulée en lien avec celle du taux de désoxygénation et du niveau de désoxygénation | 71 |
| Figure 4.13 | Relation entre la variance de la fraction recouverte cumulée et celle du taux de désoxygénation..... | 73 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 4.14 | Relation entre la variance de la fraction recouvrée cumulée et celle du niveau de désoxygénation..... | 74 |
| Figure 4.15 | Analyse sommaire de la variance de la fraction recouvrée à chaque traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée..... | 75 |
| Figure 4.16 | Débits d'eau spécifiques observés pour les essais de type temps de résidence (TR)..... | 80 |
| Figure 4.17 | Temps de résidence (tR) du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$)..... | 80 |
| Figure 4.18 | Variation maximale du signal de conductivité ($\Delta\phi_{\text{max moy}}$) due au sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$)..... | 81 |
| Figure 4.19 | Critère de linéarité du signal de conductivité ($\approx \int / \text{Aire } \Delta_{\text{moy}}$)..... | 81 |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités

Distance

| | |
|----|------------|
| mm | millimètre |
| cm | centimètre |
| m | mètre |
| ' | piéd |
| " | pouce |

Temps

| | |
|-----|---------|
| s | seconde |
| min | minute |
| H | heure |

Volume

| | |
|----|------------|
| L | litre |
| mL | millilitre |

Débit

| | |
|--------------|------------------------|
| L/min ou LPM | Litre par minute |
| mL/min | millilitre par minute |
| mL/s | millilitre par seconde |

Masse

| | |
|-----|-------------|
| mg | milligramme |
| g | gramme |
| kg | kilogramme |
| mol | mole |

Concentration

| | |
|------------|---------------------------|
| M ou mol/L | molaire ou mole par litre |
| mg/L | milligramme par litre |
| g/L | gramme par litre |

XVIII

Pression

| | |
|------|-----------------------|
| Pa | pascal |
| kPa | kilopascal |
| bar | bar |
| mmHg | millimètre de mercure |
| psi | livre par pouce carré |

Température

| | |
|----|---------------|
| °C | degré Celsius |
| K | Kelvin |

Conductivité

| | |
|---------------|--------------|
| μS | microSiemens |
|---------------|--------------|

Potentiel

| | |
|----|-----------|
| mV | millivolt |
| V | volt |

Symboles

| | |
|-------|------------------------------|
| F | Constante de faraday |
| R | Constante des gaz parfaits |
| P | Pression |
| T | Température |
| K_i | Constante d'équilibre donnée |

INTRODUCTION

La problématique environnementale dans lequel s'inscrit ce projet de recherche concerne le rejet dans les milieux récepteurs, plus particulièrement les eaux, de contaminants dont les impacts sur l'environnement, sont souvent ignorés ou bien non contrôlés adéquatement. Elle pose la question de la priorité à accorder à l'utilisation d'une substance chimique en raison d'un avantage spécifique versus la compréhension des impacts globaux de son utilisation. En résumé, quelle est le niveau de précaution à appliquer et quelles sont les priorités qui le définissent advenant son utilisation? Si tel est le cas, est-ce qu'il sera possible d'en minimiser l'impact par traitement?

À titre d'exemple, l'industrialisation engendre à l'échelle mondiale la mise sur le marché de plus de 1 000 nouveaux produits par année dans les domaines du cosmétique, de la pharmacologie ou des produits d'entretiens (Baig et Roustan, 2010; Gagné *et al.*, 2008). Plusieurs de ces produits et de ceux qui sont déjà utilisés et rejetés dans le milieu naturel, perturbent le système endocrinien des espèces et engendrent une féminisation, une diminution de la fécondité chez les mâles et une désynchronisation des périodes de reproduction. Dans le domaine du traitement des eaux, à la fois usées et potables, l'accessibilité à une eau de qualité demeure toujours affectée par les rejets de microorganismes pathogènes à laquelle il faut adjoindre de nouvelles approches de traitement dans le but de minimiser simultanément les impacts de l'arrivée de ces nouvelles substances. Parmi les outils développés, la dégradation oxydative par l'utilisation de l'ozone s'avère une avenue pour y arriver (Hausler et al. 2009; Gagnon *et al.*, 2008).

Ces nouvelles problématiques émergentes définissent ainsi des besoins technologiques en relation avec le domaine, dans l'exemple précédent, dissoudre un gaz oxydant dans l'eau. Il devient nécessaire d'être bien positionné dans la chaîne technologique pour éviter toute dépendance en raison de la prise du marché par une nouvelle technologie plus efficace.

Mais comment s'assurer de disposer d'un système de traitement performant? L'efficacité énergétique devient critique dans le choix d'une technologie par rapport à une autre. La raison est que le concept d'efficacité énergétique est un principe de base à large spectre d'influence et d'interprétation; agissant autant sur l'efficacité chimique et physique d'un traitement visé que sur l'aspect pratique de construction des infrastructures nécessaires à sa mise en place ainsi qu'à son fonctionnement à long terme. Dès lors ce critère se traduit par un impact direct sur les coûts en capitaux qui y sont associés lors d'une implantation. Que ce soit pour une nouvelle ou bien la mise à niveau d'une ancienne installation; l'interdépendance des multiples variables associées à un système de traitement est complexe pour en évaluer la performance. Dans le domaine de l'ozonation de l'eau, les cas pratiques rapportés par (Neeman *et al.*, 2001) et (Burns *et al.*, 2011) témoignent bien des difficultés rencontrées à cet égard. Ces derniers témoignent de l'impact de simplement modifier le générateur en vue de produire une concentration en ozone plus élevée. Ceci affectera tous les sous-systèmes qui devront être en mesure de répondre efficacement à cette modification. Ainsi le nouveau générateur affectera le système de refroidissement, la nature du gaz d'origine, la dimension de la tuyauterie et sa conception, les valves de contrôles de pression et de débits, le système de diffusion et de mélange du gaz injecté, les moniteurs de détection pour l'ozone ou l'oxygène ambiants, les appareils de mesure et le système de destruction de l'ozone et tout ceci conditionné par un volume d'eau à traiter et une performance de traitement à respecter. Ils confirment qu'une technologie peut gagner en intérêt alors que les générateurs d'ozone à oxygène liquide et les systèmes d'injection en parallèle (« sidestream injection systems ») sont de plus en plus utilisés comme technologies de remplacement.

Ce dernier exemple permet toutefois de relever deux aspects génériques pour améliorer les performances. Il est possible de cibler le mode de production du gaz (l'ozone) qui demeure très énergivore et le système de mise en contact de l'agent traitant dans l'eau qui conditionne les investissements en termes d'infrastructure. C'est ce dernier aspect lié à la dissolution et la diffusion d'un gaz qui sera étudié dans ce travail.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

1.1 Revue de littérature

Tout d'abord, il est possible d'énumérer plusieurs techniques pour dissoudre un gaz tel que les diffuseurs poreux, les chambres de vaporisation, les colonnes garnies, les injecteurs, les turbines mixeurs et les diffuseurs conventionnels de fines bulles (Langlais *et al.*, 1990). Ces derniers sont utilisés alors dans une multitude de combinaison de système en vue d'un traitement spécifique donné. Voici quelques exemples de conception en lien avec certains résultats qui seront obtenus dans ce travail. Ces exemples permettent de témoigner de la difficulté de comparer les différents systèmes afin de déterminer lequel devrait être utilisé dans le développement d'une technologie novatrice de diffusion. De plus, l'incertitude sur les valeurs d'intérêts présentées est très souvent absente, limitant la connaissance de la précision obtenue.

Il y a d'abord un exemple de pilote développé pour optimiser le traitement par oxygénation de substrats à fortes charges organiques, tel le lisier de porc (Murray P et J de la NÖUE, 1998). Cette évaluation à l'échelle pilote d'un aérateur appelé « à cheminement prolongé » consiste à injecter de l'air à la base de longs tuyaux enroulés et placé dans une cuve d'acier. Il est ensuite comparé à un injecteur de type poreux. Le prototype tel que construit a offert des performances d'oxygénation globales similaires à celles démontrés par l'injecteur poreux. Une information à retenir concernant l'optimisation de leur système concerne l'accroissement maximal du volume interne des tuyaux par rapport au volume de liquide total traité. Un peu de la même manière, il y a l'exemple d'un système appelé « airlift bubble column » qui consiste en une colonne à bulle avec des tubes d'aspiration dont la longueur et le diamètre sont modifiés (Yasuda, K, *et al.*, 2010). Cette fois, le gaz utilisé est l'ozone et la décomposition du bleu de méthylène est étudiée. Il est établi alors que le ratio optimal du

diamètre des tubes d'aspiration et de celui de la colonne est de 0,5 pour que la rétention du gaz et la circulation du liquide atteigne un maximum. Les performances de décomposition et de transfert de masse seraient également améliorées. Un autre exemple de conception est l'utilisation de deux buses pointées l'une vers l'autre sur un même axe pour vérifier l'absorption de l'acétone gazeux dans l'eau (Tamir, A., *et al*, 1990). Ils comparent alors deux types d'absorption, soit celle de vaporisation et l'autre de type bullage. Il en résultera des coefficients de transfert très similaires pour ces deux configurations. Un dernier exemple mentionné est celui de la comparaison de deux réacteurs développés par la compagnie Mazzei Injector Corporation et GDT Corporation (BALE, A. R., 2003) pour traiter à l'ozone un liquide. Le réacteur « flash mix » et le réacteur « opposing jets ». Ils sont conçus pour favoriser le contact des deux phases. Les résultats montrent que les deux systèmes ne présentent que très peu de différences en terme d'efficacité de transfert l'un par rapport à l'autre. Leur moyenne rapportée est de 88% pour le « flash mix » système et de 87,2% pour l'« opposing jets » système. Mais une affirmation intéressante à retenir concerne l'injecteur venturi qui est raccordé aux deux réacteurs lors des essais. Il est mentionné que ce dernier fait principalement le travail de transfert de masse dans la phase liquide, ne laissant que très peu d'ozone à dissoudre par la suite pour les réacteurs.

Cette liste peut se poursuivre longtemps alors que les critères de conception et de comparaison deviennent abstraits lorsqu'il n'existe pas référence commune simple et que les conditions d'expérimentation diffèrent autant d'un système à l'autre, malgré des critères bien définis de méthodes standards. Mais pour la conception d'un système, cette étape n'est pas essentielle. C'est ainsi que l'approche empirique de développement a rapidement pris le dessus, l'important étant de bien référer son propre système pour être en mesure de bien comparer les modifications qui seront testées. Cependant, un travail plus exhaustif de la revue de littérature devra être repris par la suite.

1.2 Cadre théorique

Dans le cadre de ce projet, la dissolution de l'oxygène est envisagée suivant les solutions idéales diluées. Le solvant est l'eau et l'oxygène est considéré comme le soluté qui obéit à la loi de Henry :

$$p_{O_2} = \chi_{O_2} K_{O_2} \quad (1.1)$$

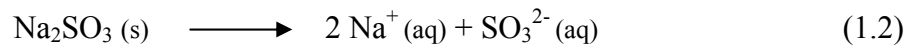
où p_{O_2} représente la pression de vapeur de l'oxygène dans le système, χ_{O_2} représente sa fraction molaire dans le solvant et K_{O_2} est la constante de Henry empirique avec des dimensions de pression. Un exemple à 298 K de cette constante est une valeur de $4,4 \times 10^6$ kPa (tiré de Atkins, 7^e édition).

Cependant, la variable physique principalement utilisée afin d'établir tout le système de comparaison de la performance de dissolution de l'oxygène sera tout simplement la masse d'oxygène dissous par litre d'eau et sera appelé le taux d'oxygène dans ce travail.

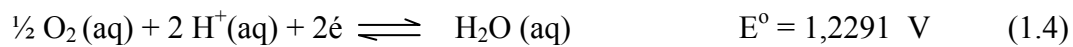
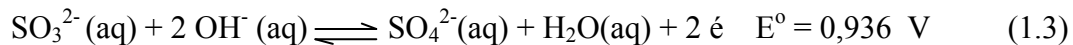
Certaines précisions terminologiques s'imposent. La performance générale de dissolution de l'oxygène dans le milieu englobant toutes les variables influençant le processus sera appelé la capacité à oxygéner. Deux sous-critères sont particulièrement utilisés pour caractériser cette performance. Il y a la capacité à dissoudre qui sera vu comme un processus dynamique caractérisant l'évolution de la masse d'oxygène qui est dissous à chaque étape d'un processus d'oxygénation de l'eau, et la capacité à saturer qui est vu comme la variable caractérisant le retour à la saturation mais en le comparant à un état d'équilibre de référence initiale. Finalement, le terme saturation désignera un état d'équilibre caractérisant la masse d'oxygène dissous dans l'eau par rapport à celle présente dans l'atmosphère aux conditions de température et de pression données. Un glossaire plus élaboré est présenté à l'ANNEXE XII à titre d'aide-mémoire.

Pour être en mesure de caractériser la capacité à saturer et la capacité à dissoudre, il faudra désoxygéner de l'eau. Le contrôle de cette méthode s'avère très importante. Le choix

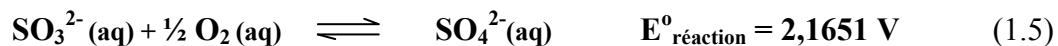
s'oriente rapidement vers une désoxygénation chimique par l'utilisation de sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$). Le produit est une poudre blanche stable, pouvant être pesée exactement et facile à ajouter à l'eau d'un réservoir. Le risque à la santé est minime, même en cas d'exposition prolongée ou de contact répété pouvant alors causer une sensibilité cutanée et de l'asthme. Désoxygéner devient simple et rapide à exécuter, même pour de grand volume d'eau. Suivant le taux d'oxygène initial, il est possible d'ajouter exactement la bonne masse de sulfite pour atteindre un taux d'oxygène souhaité. La difficulté est cependant de déterminer cette masse. Mais voici le raisonnement menant à l'équation chimique utilisée. Tout d'abord, il est supposé que la dissociation du sulfite de sodium en solution est complète. Ainsi le nombre de moles de $\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$ ajoutés correspond au nombre de moles d'ions sulfites générés



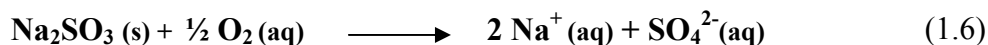
Les demi-réactions suivantes avec leur potentiel standard de réduction (tiré de Harris, 7^e édition) sont possibles



Leur somme donne la réaction d'oxydoréduction ciblée avec son potentiel de réaction calculée



Cette réaction explique très bien la consommation de l'oxygène de l'eau. C'est donc cette dernière équation qui est utilisée comme guide de référence pour calculer la masse théorique de sulfites de sodium à cibler initialement pour désoxygéner l'eau; elle peut être réécrite sous la forme générale



L'équation de Nernst (tiré de Atkins, 7^e édition), permet de calculer la constante d'équilibre de la réaction soit

$$K = e^{-(nFE^0/RT)} = 1,56 * 10^{73} \quad (1.7)$$

Ce calcul supporte l'idée que la réaction de consommation de l'oxygène et de transformation des sulfites en sulfates est complète à une température de 298,15 K; où F est la constante de Faraday, R la constante des gaz parfait, T est la température précédemment citée à laquelle la réaction est considérée. L'expression (RT/F) utilisée vaut 25,693 mV dans le calcul, E⁰ est le potentiel de réaction standard calculé de 2 165,1 mV et n le nombre d'électrons échangés, soit deux. Cette équation devient un outil de calcul pratique tout en permettant d'amorcer une compréhension plus adéquate de la désoxygénation de l'eau. À titre d'exemple, s'il est estimé pour l'eau d'essai un taux moyen d'oxygène dissous de 9,68 mg/L à 25 °C; la concentration molaire associée est de 9,68 (mg/L)/32 000 (mg/mol) ou 0,0003025 M. L'équation montre qu'il faut 0,000605 M en sulfites de sodium pour transformer complètement cette masse d'oxygène. En multipliant cette dernière par la masse molaire de 126 g/mol du Na₂SO_{3(s)}, la masse de sulfites à ajouter par litre d'eau est de 0,07623 g. Évidemment, cette valeur ne tient pas compte de tous les interférents possibles mais elle donne une indication très cohérente de la masse à ajouter lors de la conception du protocole expérimentale.

En terminant, un autre critère de performance est considéré, soit la capacité d'un agent traitant à se rendre à la molécule d'intérêt et interagir avec cette dernière pour la transformer chimiquement ou pour s'y lier physiquement. Cet aspect sera nommé généralement dans le texte «capacité à interagir». Deux sous-critères sont ciblés dans un premier temps pour qualifier et quantifier ce critère, soit la distribution dans le milieu et le temps de résidence. La distribution dans le milieu est liée à la notion de mélange dans l'eau alors que le temps de résidence désigne le temps nécessaire à un intrant chimique pour traverser complètement le

système étudié (le pilote) et en être éliminé du circuit d'eau; du moment de son injection dans le circuit au moment où l'effet de sa présence ne se fait plus sentir à la sonde de mesure. Un synonyme pourrait être le temps de présence dans le circuit d'eau. Il faut voir que c'est un temps physique ou mécanique général. C'est-à-dire qu'il englobe toute cinétique de réaction associée à l'intrant chimique qui pourrait venir l'influencer. Il serait possible cependant de définir une notion de temps encore plus spécifique et importante pour la capacité à interagir, soit le temps de contact. Le temps de contact serait vraiment la mesure du temps moyen que passe une molécule d'agent traitant dans l'«environnement réactif immédiat» de la molécule tout le long de son passage dans le pilote. Il faudrait bien sûr définir ce que l'on entend par environnement réactif immédiat. L'aspect intuitif de ces notions est conservé actuellement afin de minimiser l'ampleur du travail actuel. La notion de mélange et de temps de résidence suffiront à introduire le sujet dans l'optique d'obtenir de l'information pertinente pour discriminer les expériences réalisées.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

La finalité derrière le projet est de développer une technologie de diffusion d'un gaz dans l'eau. Cette dernière devrait être simple et facile à mettre en production, compétitive à l'achat, à l'utilisation, à l'entretien et être adaptable à tout type d'installation en eaux potables et usées. L'hypothèse de recherche en est une de conception. Elle souhaite valider le fait que modifier la zone de diffusion, même simplement, présente un avantage pour développer une telle technologie. L'objectif général du projet est donc de structurer cette démarche de développement technologique et de fournir de l'information quant aux critères de performance à retenir. Plus spécifiquement, à la fin de ce travail, on souhaite disposer d'un pilote bien référencé et contrôlé permettant de poursuivre le travail de développement. Une configuration physique de base, appelé mode de référence, aura été établi pour fin de comparaison. De même, il est souhaité avoir modifié quelques aspects physiques de la diffusion du gaz sur le pilote pour en comparer les avantages. Et finalement, l'utilisation d'une caméra à capture rapide devra avoir été initiée comme un outil d'analyse potentiel pouvant aider au développement technique et scientifique du projet.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Conception et principe de fonctionnement du pilote

Tout d'abord, avant d'arriver à la mise en place concrète d'un pilote opérationnel apte à réaliser des expériences pertinentes quant à la dissolution de l'oxygène dans l'eau, un premier banc d'essai préliminaire et exploratoire a été construit. Les nombreuses expériences ont été réalisées afin d'obtenir des informations sur les variables importantes à considérer initialement. Elles ont permises de se familiariser avec certains aspects techniques concernant les appareils de mesures, la technique de désoxygénation de l'eau et une prévisualisation du protocole d'expérience utilisant l'oxygène de l'air comprimé comme gaz servant aux expérimentations. Il fallait être en mesure de désoxygéner un certain volume d'eau, de le faire passer dans le pilote tout en lui ajoutant de l'air et de mesurer la quantité d'oxygène qui était alors dissous durant ce passage. Bref ce premier contrôle a permis de définir les balises initiales de conception du pilote qui se résume à travers la schématisation de la figure 3.1.

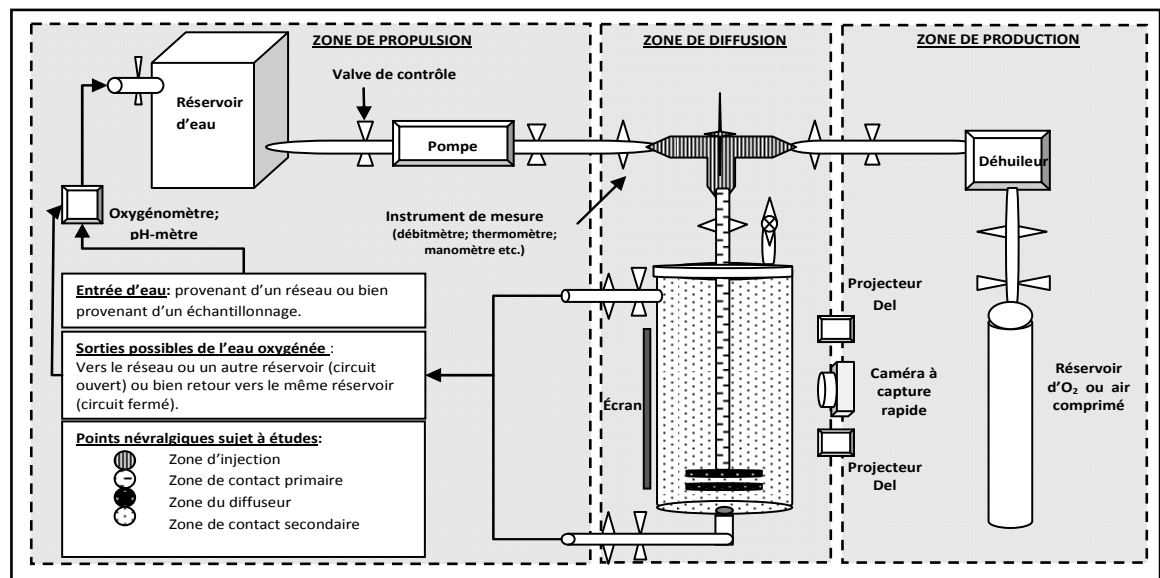


Figure 3.1 Schématisation du pilote

Le pilote est donc construit suivant ce schéma général. La figure 3.2 en est une représentation physique.

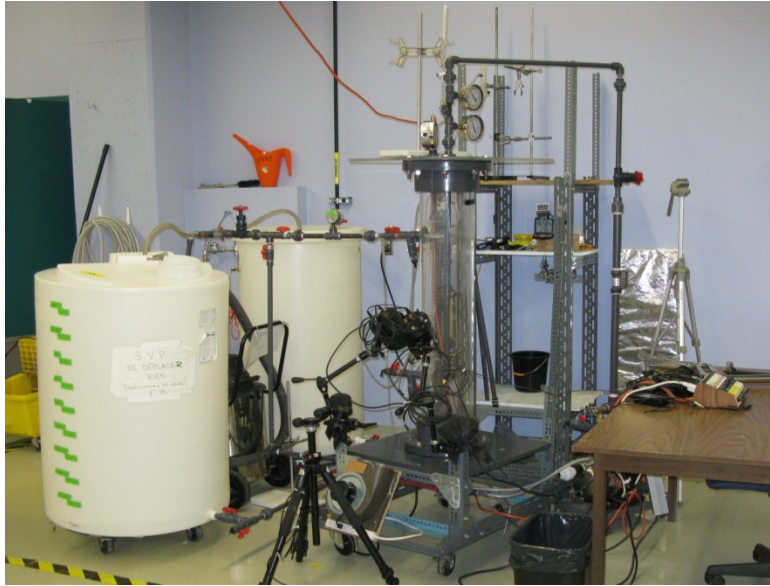


Figure 3.2 Aspect général du pilote

Son fonctionnement, en lien avec les figures précédentes se résume ainsi. Tout d'abord, le réservoir est initialement rempli de l'eau d'essai à utiliser suivant le cas. Les deux réservoirs et la pompe constitue la zone de propulsion sur le schéma. En démarrant la pompe, un débitmètre situé après celle-ci sur le circuit d'eau permet de mesurer le débit qui pourra varier entre 3 L/min et 15 L/min. Cette mesure sert à établir le ratio G/L de la phase gazeuse sur la phase liquide alors que le débit de gaz est également mesuré pour ce faire. En effet, la zone de production est la partie associée au circuit de gaz de sa source jusqu'à l'injecteur. Sur le circuit du gaz, trois débitmètres offrant des échelles de mesures allant de 0 à 36 mL/min, 30 à 300 mL/min et 600 à 6000 mL/min sont installés. L'ANNEXE III présente la méthode de calibration utilisée en raison d'un intérêt pratique. Il y a également deux manomètres qui sont installés; l'un à la sortie de la ligne d'air comprimé et l'autre à l'entrée de l'injecteur. Le premier mesure la pression de sortie du gaz qui est maintenue à un bar. Le dernier est un témoin de l'aspiration présente ou non à l'injection du gaz. Il y a aussi un thermomètre présent pour mesurer la température. Par la suite, l'eau et le gaz vont se rencontrer dans la zone de diffusion qui est celle constituée d'un injecteur venturi, du tuyau

entrant dans la colonne d'eau, de cette même colonne et du circuit d'eau retournant dans les réservoirs. La pression d'eau est mesurée tout le long du circuit à l'aide de cinq manomètres. Ils permettent d'établir la perte de charge à l'entrée de l'injecteur, à sa sortie, au sommet de la colonne d'eau et sur les deux lignes d'eau sortant de la colonne avant de revenir aux réservoirs. La zone de diffusion est divisée en quatre zones d'intérêt technique. Il y a la rencontre initiale des deux phases qui se fait à travers la zone d'injection. Elle se poursuit avec la zone de contact primaire qui relie l'injecteur à la zone du diffuseur. Finalement, l'intérieur de la colonne d'eau constitue principalement la zone de contact secondaire. La transparence de la zone de contact secondaire est nécessaire afin de rendre possible l'utilisation de la caméra à capture rapide afin d'observer le comportement des bulles et de leur mélange. Par la suite, c'est le retour de l'eau dans la zone de propulsion. Cependant, une fraction de cette dernière est dérivée vers les sondes de mesures. Ces dernières sont introduites dans des cylindres ouverts contenant l'eau en circulation. Le positionnement de ces cylindres doit être ajusté à chaque expérience pour s'assurer de l'équilibre hydrique et d'une prise de mesure adéquate. Une caméra numérique est utilisée pour filmer en continu le cadran des divers appareils mesurant le taux en oxygène, la conductivité, le pH et la température de l'eau. Finalement, le pilote permet de ramener l'eau d'essai initialement pompée soit dans le même réservoir, ce qui est appelé un circuit fermé, ou bien dans un second réservoir qui est appelé un circuit ouvert. Une description plus exhaustive du matériel important utilisé et de quelques caractéristiques associées à l'utilisation du pilote lors des expérimentations est faite au tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques techniques associées à l'utilisation du pilote lors des expérimentations

| SECTION TUYAUTERIE | |
|--|--|
| Matériel | Description |
| Réservoirs | <p>En polypropylène et de taille différente; celui nommé R1 a une hauteur de 123 ± 1 cm; un diamètre de 60 ± 1 cm; un volume total estimé à 348 ± 1 L et un volume mort estimé à 21 ± 1 L. Il possède un large couvercle amovible par lequel le circuit d'eau au retour est raccordé et un raccord au bas de ce dernier comme prise d'eau. Celui nommé R2 a une hauteur de 104 ± 1 cm; un diamètre de 75 ± 1 cm; un volume total estimé à 459 ± 1 L et un volume mort estimé à 7 ± 1 L. Ce dernier est complètement fermé avec un petit couvercle sur le dessus. Le retour d'eau est réalisé par l'ajout d'un raccord central directement dans le plastique et la prise d'eau est située au bas du réservoir.</p> |
| Colonne d'eau (Zone de contact secondaire) | <p>Les brides de raccordement sont en pvc mais la partie transparente est en acrylique. La hauteur mesurée est de 122 ± 1 cm, le diamètre de 20 ± 1 cm et le volume total de 39 ± 1 L. La base est une plaque de $\frac{1}{2}$ pouces en pvc SCH-80 étanchée à l'aide d'un joint en caoutchouc pour bride de 8 pouces alors que le couvercle est à la différence transparent et en plexiglass mais étanché de la même façon. Un raccord pour le circuit d'eau principale avec les joints appropriés sont ajoutés à la plaque et au couvercle. La colonne dispose quant à elle de deux sorties d'eaux supplémentaires à la base et au haut de la partie transparente avec les joints et valves appropriés. Une règle de 15 cm a été apposée sur la surface de la colonne telle que le zéro de la règle est situé à $88,8 \pm 0,2$ cm du plancher (plaque) de la colonne.</p> <p><u>Configuration possible de la colonne :</u></p> <p>Le mode avec anneaux de Rachig concerne le compactage de la colonne à l'aide de petites plaques en acier inoxydable optimisant la surface de contact. Le nombre d'anneaux de Rachig utilisé était de 977 ± 1 alors que la moyenne de la masse totale pesée de ces derniers était de $5135,7 \pm 0,1$ g et celle de la masse unitaire d'un seul anneau de $5,25 \pm 0,01$ g.</p> |

| SECTION TUYAUTERIE | |
|----------------------------------|---|
| Matériel | Description |
| Tuyau de contact primaire | <p>Tuyau en pvc gris SCH-40 de ½ pouces de diamètre interne. La longueur totale de référence a été fixée à $94,0 \pm 0,5$ cm.</p> <p>Note : Pour la prise de photos à l'aide de la caméra haute-vitesse, une attache tout usage (Duramax; 19 cm de longueur, naturel standard, résistant aux U.V. Lot 85 : 06-0601235) est fixé sur le bout du tuyau. L'attache a une largeur de 5 mm et 1mm sépare chaque rainure de la suivante. Cependant, des taches noires de 5 mm ont été ajoutées au marqueur indélébile comme référence supplémentaire.</p> <p><u>Configurations possibles du tuyau :</u></p> <p>Le mode jet libre de référence est le simple tuyau fileté à l'une des extrémités.</p> <p>Le mode avec buse est le tuyau fileté aux deux extrémités dont l'une se raccorde à un joint femelle-femelle pour permettre d'y insérer la buse de type SS CO FULLJET ½ HH 316SS 40.</p> <p>Le mode avec mélangeurs statiques consiste à introduire dans le tuyau fileté au deux extrémités 6 mélangeurs de forme hélicoïdale en plastique jaune de longueur moyenne de $15,5 \pm 0,05$ cm et de diamètre moyen de $12,7 \pm 0,5$ mm.</p> <p>Le mode LTCP (Longueur du Tuyau de Contact Primaire) est le simple tuyau fileté à une extrémité ramené à une longueur de $25,25 \pm 0,05$ cm.</p> |
| Ligne d'eau | <p>Tuyaux en pvc gris SCH-40 de ½ pouce de diamètre interne. Valves et raccords divers associés à cette dimension. Exception cependant à la sortie de la pompe où un tuyau en pvc gris de 1 pouce a été utilisé pour accommoder le débitmètre électronique. D'une longueur d'environ 75 cm avant le débitmètre et de 55 cm après le débitmètre, il est ensuite ramené par un réducteur au diamètre de ½ pouce.</p> |

| SECTION TUYAUTERIE | |
|------------------------------------|---|
| Matériel | Description |
| Ligne de gaz | Tuyaux flexibles transparents de ¼ de pouce; valves et raccords associés. |
| Injecteur Venturi | En PVDF avec connexion eau ½ pouce; connexion gaz raccord pression ¼ pouce; longueur totale de 17 cm; distance de l'entrée d'eau à l'axe de l'entrée de gaz de 6,4 cm et distance de l'entrée de gaz à l'axe de l'entrée d'eau de 6,4 cm. Clapet anti-retour sur l'entrée de gaz compris. |
| Pompe | La pompe est une Grundfos; type MQ3-35, Model 96860172, A-B-A BVBP, 110-120 VAC, 96/95 psi/°Fmax, Deep wall pump, E176471 Vol.4., SN 0611381A. Ses caractéristiques physiques sont Q : 13,2 GPM; H : 31 psi; Hmax : 51 psi; isolation de classe B et protégée thermiquement. |
| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
| Matériel | Description |
| Oxygénomètre | <p>YSI incorporated; modèle Pro20 avec sonde ProBOD; incluant un câble de 1 mètre avec mesure de température et oxygène dissous, capteur DBO auto-agité et capteur polarographique. La membrane utilisée est la jaune en polyéthylène de 1,25 millièmes de pouce.</p> <p>Pour la température, une plage de mesure de 0 à 45 °C avec une résolution de 0,1 °C et une précision de ± 0,3°C. Concernant l'oxygène dissous, pour la plage de mesure entre 0 et 20 mg/L la résolution est de 0,01 ou 0,01 mg/L sélectionnable par l'utilisateur et la précision est le plus grand de ± 2% de la lecture ou 0,2 mg/L. Pour la pression atmosphérique la plage de mesure est de 400,0 à 999,9 mmHg; la résolution est de 0,1 mmHg et la précision est de ± 5 mmHg dans une limite de 5 °C de la température d'étalonnage.</p> <p>Le temps de réponse est de 30 secondes pour 90% d'un changement de valeur d'oxygène dissous à 20 °C.</p> <p>Les interférents possibles sont le sulfure d'hydrogène, l'oxyde de soufre, les halogènes, le monoxyde de carbone, les chlorures, l'oxyde nitrique et nitreux, les bactéries ou les algues accumulées.</p> |

| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
|---|--|
| Matériel | Description |
| pH-mètre/ Conductimètre | Modèle : «Oakton PC 510 pH and Conductivity bench meter». Les sondes sont une électrode à pH avec connecteur BNC et une sonde à conductivité avec un senseur de température intégré avec connecteur à «6-pin» crochetées. La plage de valeur de pH est de -2,00 à 16,00 avec une résolution de 0,01 et une précision de $\pm 0,01$. Pour la conductivité c'est de 0 à 1999 μS comme plage avec résolution de 1 μS et une précision de $\pm 1\%$ de la plage plus 1 chiffre significatif. Pour la température, la plage de mesure est de -10,0 à 110,0 $^{\circ}\text{C}$ à une résolution de 0,1 $^{\circ}\text{C}$ et une précision de $\pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$. Note sur la constante de conductivité de la cellule (k) = 1,0. |
| Appareils pour la calibration des manomètres | <p>Pour une échelle de mesure allant de 3 à 200 kPa (Manomètres A.1, B, C, D, F) l'appareil utilisé est le :</p> <p>ROTATE WEIGHTS CLOCKWISE; type T110012 H.P. FACTOR X ; g: 980, 665; S/No 10092-97. Pressure standard made in U.K. by: Pressurements LTD, Unit 22, Apex, Business Centre, Boscombe Road, Dunstable, Beds, tel:(01582)471535.</p> <p>Pour une échelle de mesure allant de 20 à 3500 kPa (Manomètre A) l'appareil utilisé est le:</p> <p>ROTATE WEIGHTS CLOCKWISE; type T2300/4 H.P. FACTOR X ; g: 980, 665; S/No 10093-97. Pressure standard made in U.K. by: Pressurements LTD, Unit 22, Apex, Business Centre, Boscombe Road, Dunstable, Beds, tel:(01582)471535</p> |
| Manomètres identifiés par une lettre | Manomètres usagés réutilisés et étalonnés suivant leur échelle avec l'appareil approprié. Dans les courbes d'étalonnage, le «mesurée» correspond à la lecture de pression faite sur le cadran du manomètre et le «corrigée» correspond à la valeur de pression acceptée comme lecture exacte. |

| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
|------------------------------------|--|
| Matériel | Description |
| Manomètre A | <p>Situé sur la ligne d'eau juste avant l'entrée de l'injecteur venturi. Son échelle est graduée de 0 à 400 kPa et la plus petite division est de 5 kPa. La courbe d'étalonnage obtenue est :</p> $(A_{\text{mesurée}} \pm 2)(\text{kPa}) = (0,958 \pm 0,002) * A_{\text{corrigée}} (\text{kPa}) - (1,8 \pm 0,4)$ |
| Manomètre A.1 | <p>Situé sur la ligne d'eau juste à la sortie de l'injecteur venturi. Son échelle est graduée de 0 à 200 kPa et la plus petite division est de 2,5 kPa. La courbe d'étalonnage obtenue est :</p> $(A.1_{\text{mesurée}} \pm 0,7)(\text{kPa}) = (0,984 \pm 0,002) * A.1_{\text{corrigée}} (\text{kPa}) - (13,8 \pm 0,1)$ |
| Manomètre B | <p>Situé où la valve de dépressurisation de sécurité ajoutée au couvercle de la colonne d'eau (contact secondaire). Son échelle est graduée de 0 à 400 kPa et la plus petite division est de 2 kPa. La courbe d'étalonnage obtenue est:</p> $(B_{\text{mesurée}} \pm 1,4)(\text{kPa}) = (0,965 \pm 0,003) * B_{\text{corrigée}}(\text{kPa}) - (5,6 \pm 0,3)$ |
| Manomètre C | <p>Situé sur la ligne d'eau sortant du haut de la colonne de contact secondaire. Son échelle est graduée de 0 à 100 kPa et la plus petite division est de 2 kPa. La courbe d'étalonnage obtenue est:</p> $(C_{\text{mesurée}} \pm 0,6)(\text{kPa}) = (0,981 \pm 0,003) * C_{\text{corrigée}} (\text{kPa}) - (0,8 \pm 0,2)$ |
| Manomètre D | <p>Situé sur la ligne d'eau inférieure sortant du dessous de la colonne de contact secondaire. Son échelle est graduée de 0 à 15 psi et la plus petite division est de 0,5 psi. L'étalonnage donne :</p> $(D_{\text{mesurée}} \pm 0,1)(\text{psi}) = (0,1401 \pm 0,0007) * A_{\text{corrigée}} (\text{kPa}) - (1,22 \pm 0,04)$ |
| Manomètre F | <p>Situé sur la ligne d'eau juste avant l'entrée de l'injecteur venturi. Son échelle est graduée de -100 à 200 kPa et la plus petite division est de 10 kPa. La courbe d'étalonnage obtenue :</p> $(F_{\text{mesurée}} \pm 1)(\text{kPa}) = (0,978 \pm 0,002) * F_{\text{corrigée}} (\text{kPa}) - (4,9 \pm 0,2)$ |

| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
|------------------------------------|---|
| Matériel | Description |
| Déhuileur et son manomètre | Appareil agissant comme un filtre, une valve de contrôle et un manomètre qui est fixé à la sortie de la ligne d'air comprimé du système globale de l'Université. Il permet d'assurer un contrôle de la pression initiale de l'air injecté et de filtrer les particules d'huiles pouvant être rejeté par le compresseur. |
| Débitmètres | Ces derniers sont usagés et sont étalonnés à partir de la méthode développée pour ce faire. Pour les courbes d'étalonnage, le «mesurée» correspond à la lecture de débit faite sur l'échelle ou le cadran et le «corrigée» correspond à la valeur de débit acceptée comme lecture exacte. |
| Débitmètre fa | <p>Débitmètre utilisé pour la mesure de faibles débits de gaz.</p> <p><u>Caractéristiques</u> : AALBORG INSTRUMENTS FM042-09ST PMR6-010002 S/N 151679-4; std mL/min CO2 à 21,1 °C et 1 atm, max 200 psib, échelle de 0 à 20 mL/min; divisé à 1,0 mL/min.</p> <p>La gamme de débits mesurables avec certitude est de 0 à 36 mL/min et la droite d'étalonnage obtenue pour l'air comprimé est la suivante :</p> $(f_{\text{a corrigé}} \pm 0,2)(\text{mL/s}) = (0,0269 \pm 0,0008) * f_{\text{a mesuré}} (\text{mL/min}) + (0,0566 \pm 0,0096)$ |
| Débitmètres mo | <p>Débitmètre utilisé pour la mesure de moyens débits de gaz.</p> <p><u>Caractéristiques</u> : Cole Parmer; max Pressure 200 psiG (1379 kPa); STD NITROGEN AT 21,1 °C & 1 ATM; numéro sur tube de verre 032-22-N; échelle de 0 à 200 mL/min et divisé au 5 mL/min.</p> <p>La gamme de débits d'air mesurables avec certitude est de 30 à 300 mL/min et la droite d'étalonnage obtenue pour l'air comprimé est la suivante :</p> $(m_{\text{o corrigé}} \pm 0,9)(\text{mL/s}) = (0,037 \pm 0,004) * m_{\text{o mesuré}} (\text{mL/min}) + (0,3 \pm 0,3)$ |

| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
|------------------------------------|---|
| Matériel | Description |
| Débitmètre Fo | <p>Débitmètre utilisé pour la mesure de forts débits de gaz.</p> <p><u>Caractéristiques</u>: Cole Parmer; TEFLON FLOWMETER; max Pressure 200 psiG (1379 kPa); numéro sur tube de verre 102-05-N; échelle de 0 à 150 mm et divisé au mm.</p> <p>La gamme de débits d'air mesurables avec certitude est de 600 à 6000 mL/min et la droite d'étalonnage obtenue pour l'air comprimé est la suivante :</p> $(F_{O\text{corrigé}} \pm 6)(\text{mL/s}) = (0,068 \pm 0,01) * F_{O\text{mesuré}} (\text{mL/min}) - (2 \pm 1)$ |
| Débitmètre Do | <p>Débitmètre électronique pour la mesure du débit d'eau.</p> <p><u>Caractéristiques</u>: GPI Electronic Digital Meter, Great Plains Industries Inc.; Wichita, Kansas, Model A109G NN100NA1; Non commercial.</p> <p>La gamme de débits d'eau atteignables avec certitude varie entre 3 et 15 L/min et la droite d'étalonnage utilisée est la suivante :</p> $(D_{O\text{corrigée}} \pm 0,4)(\text{L/min}) = (1,3 \pm 0,02) * D_{O\text{mesuré}} (\text{L/min}) - (0,2 \pm 0,2)$ |
| Balances électroniques | <p>Pour la mesure de la masse des produits chimiques pesés, de la masse d'un anneau de Rachig et de la masse d'air dans un ballon gonflable; la balance de précision du laboratoire a été utilisée soit :</p> <p>Metler AT261 Deltarange; $\pm 0,1$ mg à 205 g max et $\pm 0,01$ mg à 62g max.</p> <p>Pour la mesure de la masse totale des anneaux de Rachig la balance électronique suivante a été utilisée :</p> <p>Explorer Pro, OHAUS; Max de 22000g à $\pm 0,1$g</p> |
| Thermomètre pour le gaz | <p>TEL-TRU, Rochester inc. USA, échelle -40 °C à 70 °C; précision de lecture à ± 1 °C</p> |

| SECTION APPAREILS DE MESURE | |
|--|--|
| Matériel | Description |
| Ballons gonflables | Ballons utilisés dans la méthode de calibration développée pour les débitmètres pour l'air injecté : Ballons «Celebrations» de la Cie DOLLARAMA,# 13-1300129, Qualité Hélium, 12", jaune |
| Système de la caméra haute-vitesse | La compagnie est Integrated Design Tools Inc. (IDT), la caméra est le modèle Y5, numéro de série 20-0508-0063 avec mémoire interne de 16 GB, couleur, lentille de 35 MM C-Mount; avec deux projecteurs Constellation 19 Motion LED. Le logiciel de visualisation (software) est le «IDT Motion studio Win32-Image Acquisition and processing-version 2.09.06» |
| Lampes | Deux lampes projecteurs de 600 watts au tungstène utilisés pour augmenter l'éclairage de la colonne pour la prise de photo. |
| Caméra numériques | Pour filmer les cadrans des appareils de mesure de l'oxygène dissous et du pH ou de la conductivité; deux appareils de photos numériques standards ont été utilisés. |
| SECTION PRODUITS CHIMIQUES | |
| Matériel | Description |
| Air comprimé | Provenant du système de l'École de technologie supérieure |
| Chlorure de potassium (KCl) | Masse molaire de 74,55 g/mol; pureté 99% ACS;code O M-25 P1870; VWR Scientific Products; Steppe: contenant #32 orange au laboratoire. |
| Sulfites de sodium (Na₂SO₃ (s)) | Sulfite de sodium anhydre, MP Biomedicals, LLC, ACS REAGENT GRADE [7757-83-7], masse molaire de 126,04, CAT NO.191445 LOT NO 95020, www.mpbio.com . Produit stable, sous forme de poudre blanche et présentant peu de risque à la santé si manipuler avec précaution. Éviter toute inhalation, ingestion et exposition prolongée. |

| SECTION PRODUITS CHIMIQUES | |
|--|---|
| Matériel | Description |
| Étalons standards NIST (suite) | <p>Fournies par Anachemia Canada Inc., Montréal, Qc:</p> <p>Solution tampon pH 7.00, colorée verte, pH à 25°C 6,99- 7,01, lot:900330;</p> <p>Solution tampon pH 4.00, colorée rouge, pH à 25°C 3,99- 4,01, lot:900513;</p> <p>Solution tampon pH 10.00, colorée bleue, pH à 25°C 9,98- 10,02, lot:900415.</p> |
| Eau distillée | Celle produite au laboratoire |
| Eau potable de la ville de Montréal | Eau d'essai utilisée pour chacune des d'expériences. L'eau était prélevée à même le robinet au laboratoire. Les caractéristiques physiques et chimiques de cette dernière peuvent être évaluées à partir des différents rapports annuels présentés par la ville. Celui de 2010 est présenté à l'ANNEXE IX. |

3.2 Plan d'expérimentation

Tout d'abord, la réalisation d'une expérience est orientée de la façon suivante : il faut être en mesure de dissoudre de l'oxygène dans l'eau comme critère de base pour évaluer la performance du pilote suivant des conditions fixées appelées configuration. Une configuration du pilote consiste au sens large à fixer toutes les variables physiques de ce dernier lors d'une expérience; de sa conformation physique à sa mécanique interne jusqu'à chaque variables thermodynamiques d'intérêts. La configuration du pilote peut être vue un peu à la manière d'un état thermodynamique; pour le pilote c'est comme une unité de base. Ensuite il faut tester différentes configurations, appelées modes, modifiant physiquement la zone de diffusion du pilote. Le mode est un ensemble de configurations caractérisées par une propriété spécifique et commune; c'est donc un sous-ensemble de l'ensemble des configurations possibles du pilote. Pour bien comprendre, en fixant chaque variable jugée utile ou indépendante pour définir une configuration du pilote, cela définit simultanément autant de modes à lesquelles appartient cette configuration. Dans ce projet, l'appellation cible en priorité celles quant à la conformation physique ou à la structure mécanique interne du pilote pour laquelle de l'information pertinente et technique est recherchée pour fin de comparaison. L'idée est que deux configurations différentes du pilote, testées suivant deux expériences différentes, peuvent appartenir à un même mode.

Le plan se définit à travers 14 expériences répétées minimalement trois fois. Cinq modes spécifiques ciblant la zone de diffusion sont testés. Il y a d'abord le mode jet libre qui est choisi comme le mode de référence pour le pilote. Il est la configuration la plus simple utilisée alors que la zone de contact primaire est un tuyau d'une longueur de $94,0 \pm 0,5$ cm inséré dans la colonne. Par la suite, les modes subséquents en constituent des variantes. Le mode LTCP est une configuration affectant la « Longueur du Tuyau de Contact Primaire ». Le tuyau est ramené à une longueur de $25,25 \pm 0,05$ cm. Le mode avec buse est l'ajout d'une buse dans la zone du diffuseur, soit à l'extrémité du tuyau de la zone de contact primaire. Le mode avec mélangeurs statiques consiste à ajouter les mélangeurs dans le tuyau du mode jet libre. Enfin, le mode avec anneaux de Rachig modifie la zone de contact secondaire de la

colonne d'eau en lui ajoutant des plaques en aciers inoxydables typiques, appelées anneaux de Rachig. Les détails techniques de ces modifications ont été fournis au tableau 3.1.

Les sept premières expériences consistent à faire varier le ratio G/L accessible dans le mode jet libre de référence. Il est nécessaire de préciser qu'il n'y a aucune restriction d'appliquée sur le débit d'eau; ce dernier est le maximum fournit par la pompe dans ces conditions. L'expérience #1 est appelée acquisition du bruit de fond alors que le ratio G/L fixé est nul; c'est-à-dire qu'il n'y a pas de gaz d'ajouté. Par la suite, les six autres sont construites en ajustant le débit d'eau et de gaz sur le pilote de sorte de tester des ratios G/L successifs de 0,0008; 0,002; 0,008; 0,02; 0,08 et 0,3.

La huitième expérience planifiée demeure dans le mode jet libre de référence mais cherche à obtenir de l'information lorsque le ratio G/L de la phase gazeuse sur la phase liquide est conservé; mais que les débits d'eau et de gaz sont différents et nécessairement à la baisse. Cette fois une restriction est appliquée sur le débit d'eau à l'aide de la valve prévue à cette fin. Le ratio G/L ciblé est celui de l'expérience #6 à 0,08 qui est choisie comme base comparative. Ceci explique la notation utilisée dans le titre de ces expériences présentant des fractions dont les numérateurs et dénominateurs déterminent des débits différents, mais que le ratio demeure cependant le même.

Le mode buse sert ensuite à définir la neuvième et la dixième expérience. La neuvième est réalisée de sorte que le débit d'eau soit le même que celui de l'expérience #6, obligeant le ratio G/L à tourner autour de 0,05; tandis que la dixième est conçue de sorte d'obtenir le même ratio G/L de 0,08. L'objectif derrière ces expériences est de tirer de l'information concernant l'avantage de modifier la zone du diffuseur.

Concernant la onzième et douzième expérience définie, c'est le mode avec mélangeurs statiques qui s'applique. Cette fois, l'information recherchée concerne l'effet de modifier l'intérieur de la zone de contact primaire. Le ratio G/L de 0,08 est visé pour la onzième

expérience alors que pour la douzième, c'est le même débit de gaz que l'expérience #6 donnant un ratio G/L tournant autour de 0,098.

La treizième expérience est celle avec anneaux de Rachig à un ratio de 0,08. Cette fois la modification concerne la zone de contact secondaire et son remplissage afin d'en évaluer l'importance.

Enfin, la quatorzième expérience mesure l'effet de la variation de la longueur de la zone de contact primaire. C'est le mode LTCP évalué pour le ratio G/L de 0,08.

3.3 Approche expérimentale

Tout abord, un essai représentera toutes les manipulations réalisées sur le pilote lors du traitement d'un volume spécifique d'eau. Une expérience est un ensemble d'essais réalisés en vue de tirer de l'information précise d'une configuration donnée du pilote par rapport à un mode d'intérêt. Un choix est fait quant au mode de circulation de l'eau dans le pilote à chaque essai, soit celui d'utiliser un circuit ouvert qui consiste à transférer le volume d'eau entièrement d'un réservoir à un autre. Par la suite, la procédure peut être inversée. À chaque passage, les principales caractéristiques physiques mesurées sont la masse d'oxygène dissous dans l'eau, la température de l'eau, celle du gaz, le pH, la conductivité, les pressions d'eau et de gaz, les débits d'eau et d'air.

L'approche générale adoptée consiste à toujours utiliser la même quantité d'eau à chaque expérience donnée, soit environ 300L. Ceci est un aspect de comparaison des expériences entre elles. L'eau d'essai utilisée est l'eau potable de la ville de Montréal. Lors du déroulement d'une expérience, la première catégorie d'essai réalisé est appelé la mesure du blanc. Cette dernière permet d'établir la teneur initiale en oxygène de l'eau et d'établir la masse en sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) qui devra être ajoutée subséquemment pour la désoxygénation de l'eau. Cette masse se situe habituellement autour de 18 g dans le cadre des expériences réalisées.

Immédiatement après avoir mesuré les conditions initiales de l'eau, le prochain essai consiste à réaliser le suivi d'un traceur. Le traceur utilisé est également le sulfite de sodium. Le principe est d'observer la variation du signal de conductivité lorsqu'une solution de 10 mL d'une concentration de 0,1 g/mL est injectée. À partir de ce signal, le critère de performance nommé capacité à interagir est évalué à travers deux sous-critères, le temps de résidence du traceur et sa distribution dans l'eau. Le temps de résidence sera défini comme le temps que prend le signal de conductivité pour revenir à sa valeur initiale avant l'injection de la solution. Ce type d'essai suit immédiatement la mesure du blanc afin d'optimiser les opérations lors d'une journée d'expérimentation permettant le déroulement d'un protocole unique. Ensuite, ceci permet de conserver des conditions d'expérimentations similaires caractérisant la répétition de l'expérience en cours. Le sulfite de sodium déjà ajouté à travers la solution d'injection s'additionnera alors naturellement à la masse de sulfites beaucoup plus significative impliquée à l'essai suivant, la mesure du zéro. Le principal port d'injection est situé à l'injecteur venturi en raison de l'aspiration présente. Un système de valve et de tube en verre permet d'y introduire la solution d'injection et de l'injectée au moment choisie lors de l'essai. Cependant, un second port est utilisé à la sortie d'eau du réservoir pour les expériences en mode mélangeurs. La seringue utilisée pour recueillir la solution est raccordé à l'aide d'un tuyau flexible à ce port et l'injection se fait par une poussée manuelle du piston de la seringue.

La mesure du zéro peut être vue comme un conditionnement de l'eau d'essai désoxygénée pour la préparer à son oxygénation subséquente. Il est le seul essai qui n'est pas réalisé dans les mêmes conditions de ratio G/L fixées pour les autres essais de l'expérience en cours, car aucun gaz ne doit être ajouté. La masse de sulfite pesée est d'abord ajoutée dans le réservoir contenant l'eau et elle est brassée pour être désoxygénée. Ensuite, son passage dans le pilote est utilisé pour assurer une uniformisation de la désoxygénation et pour acquérir les données concernant le niveau d'oxygène de l'eau après désoxygénation. De ceci, il est possible de déduire la masse d'oxygène par litre d'eau qui a été retirée en combinaison avec les données obtenues lors de la mesure du blanc. Il faut s'assurer d'une désoxygénation similaire à

chaque répétition d'une expérience et pour chaque expérience réalisée afin de valider la comparaison des résultats obtenus.

La dernière catégorie d'essais qui est réalisée à la fin d'une expérience concerne la performance d'oxygénation du pilote dans la configuration choisie. Ce sont les essais de types mesure de la réoxygénation. Ils permettent de mesurer la réponse analytique du pilote en raison de l'injection de gaz par rapport à l'eau d'essai qui a été désoxygénée. Ils sont également appelés une étape dans la réoxygénation de l'eau ou un traitement en vu de saturer de nouveau l'eau d'essai. En effet, lors d'une expérience, cet essai permet d'établir la masse d'oxygène qui est dissous par le pilote et il est répété successivement jusqu'à ce que le taux d'oxygène mesuré dans l'eau n'augmente plus et recommence à baisser. À partir de cette variable, le critère générique de comparaison de performance nommé capacité à oxygéner est évalué. Ce dernier est subdivisé en sous critères soit la capacité à dissoudre, la capacité à saturer, le temps d'un essai, le nombre d'essais nécessaire, la durée totale d'une expérience, l'efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajoutée autant que la quantité totale utilisée. L'ANNEXE VII présente en détails le portrait typique du protocole appliqué lors d'une journée d'expérimentation.

3.4 Courbe corrective du taux d'oxygène mesuré en raison de la variation de la température de l'eau

Tout d'abord, il est difficile d'obtenir une eau d'essai qui soit à chaque répétition d'une expérience exactement à la même température tout autant qu'au même taux d'oxygène initial. Qui plus est, une augmentation systématique de la température de l'eau s'observe à chaque passage dans le pilote. Cet effet est attribué à la pompe et il est mesuré dans chacune des expériences pour établir une moyenne expérimentale par passage estimée à $0,5 \pm 0,2$ °C (voir ANNEXE V). Une courbe empirique est donc construite pour corriger le taux d'oxygène mesuré lors d'un essai en le ramenant à sa valeur attendue à une température de référence fixée. Elle repose sur les axiomes suivant. L'eau d'essai utilisé est en équilibre thermodynamique par rapport à la saturation en oxygène. Dans les expérimentations réalisées la plupart des taux d'oxygène mesurés ne caractérisent pas un tel état. Il est supposé que la correction à appliquer en raison de la différence de température de l'eau demeure la même ou est indépendante du retour vers l'équilibre thermodynamique de saturation en oxygène. Dans l'intervalle de températures mesurées de 19°C à 28°C, il est supposé que la variation du taux d'oxygène en fonction de la température est linéaire et que la fonction dérivée est une constante. Pour établir la courbe de correction, un développement de Taylor du premier degré est choisi et la valeur de la dérivée est estimée en utilisant la pente des droites de régression des différents essais conservées. Le modèle de la courbe de correction à établir est le suivant

$$O_2 \text{ corrigé} \approx O_2 \text{ mesuré} + \text{modèle de la dérivée}(T) * (T \text{ mesuré} - T \text{ corrigé}) \quad (3.1)$$

La température de référence choisie correspond dans le cas présent à la température ambiante du laboratoire et elle est fixée à exactement 23 °C. Le taux d'oxygène mesuré correspond à celui d'un système ouvert sur l'atmosphère. Voici la courbe de correction obtenue

$$O_2 \text{ corrigé à } 23 \text{ °C} \approx O_2 \text{ mesuré} + (0,17 \pm 0,06) * (23,0 - T \text{ mesuré (°C)}) \quad (3.2)$$

3.5 Intégration de la caméra haute-vitesse comme méthode de mesure

La difficulté de cette section réside dans la construction de toute pièce d'une méthode adaptée au pilote pour laquelle de nombreux choix sont possibles. Il faut filmer les bulles de gaz pour obtenir de l'information pertinente quant à leur taille, leur distribution et leur mouvement et il faut trouver une façon d'analyser les photos. Voici l'approche adoptée :

Tout abord, la première étape cible le type d'image à obtenir à l'aide de la caméra en imaginant simultanément la méthode de traitement photo. L'idée est d'utiliser une technique d'analyse préliminaire simple et rapide, offrant un niveau de précision et d'exactitude suffisant pour suivre l'évolution des caractéristiques ciblées du jet de bulles en fonction des différentes conditions fixées sur le pilote. Une fenêtre de mesure caractéristique est choisie, fixée et appliquée systématiquement à toute analyse de photo de sorte de pouvoir comparer les essais entre eux. La fenêtre de mesure peut être vue comme le quadrillage d'une zone ciblée et identique pour toute photo traitée et pour laquelle les variables d'intérêts sont mesurées ou qualifiées. Deux types de photo sont donc imaginées; une caractérisée par l'appellation «Panache de bulles» et l'autre par l'appellation «Taille de bulles». La figure 3.7 et 3.8 en donne un aperçu.

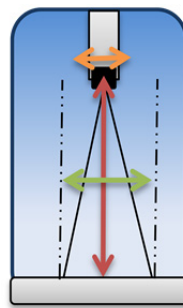


Figure 3.3 Schématisation d'une photo de type «Panache de bulle»

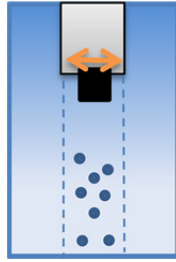


Figure 3.4 Schématisation d'une photo de type
«Taille de bulle»

Dans la figure 3.7, les paramètres d'intérêts mesurés sont la hauteur caractéristique du jet d'eau à la sortie du tuyau de contact primaire (H); la largeur caractéristique du jet descendant de bulles (L) et la dimension de référence physique connue incluse dans la photo (RP). Cette dernière est utilisée pour fin de correction des données obtenues lors du traitement logiciel des photos. La photo de type «Panache de bulle» sert également à initier une description qualitative des caractéristiques associées à la répartition et à la forme des bulles dans la colonne de contact secondaire. Ceci explique la présence de cette section dans le formulaire de description d'un essai créé à cette fin (voir ANNEXE VI). Dans la figure 3.8, les paramètres mesurés sont la taille de bulle suivant le diamètre maximal pouvant être tracé pour une bulle sans discontinuité (T) et la mesure de référence pour fin de correction (RT). Les deux types de photos servent donc à établir deux perspectives différentes concernant la sortie des bulles du diffuseur et dans la colonne de contact secondaire.

Le type de film à réaliser étant établi, la position de la caméra par rapport au pilote doit être fixée. La caméra est donc positionnée à un mètre de distance de la colonne sur un trépied et ajustée à une hauteur telle qu'elle permet la réalisation des deux plans photos mentionnés précédemment. Elle conservera cette position jusqu'à la toute fin des expérimentations. Les projecteurs «LEDs» sont pratiquement collés à la paroi de la colonne et positionnés en angle de chaque côté de cette dernière et légèrement au-dessus de l'horizon supérieure de l'image transmise par la caméra. Pour compléter l'offre d'éclairage, deux projecteurs de 600 Watts sont ajoutés et placés un peu plus en hauteur sur des supports légèrement en retrait et de chaque côté de la caméra. En raison d'un problème d'accumulation de chaleur lié à ces projecteurs, des ventilateurs sont ajoutés afin de minimiser ce problème. Un écran arrière

réfléchissant est fabriqué pour optimiser l'éclairage et la qualité photo. Les calibrations retenues sont enregistrées dans la mémoire interne de la caméra afin de pouvoir changer rapidement de plan photo lors de l'application du protocole expérimentale. Voici au tableau 3.2 les données techniques à appliquer sur la caméra et dans le logiciel pour les reproduire.

Tableau 3.2 Configuration interne de la caméra pour les photos de type « Panache de bulles » et celle de type « Taille de bulle »

| PLAN PHOTO | CONFIGURATION DE LA CAMÉRA ET DU LOGICIEL |
|------------------|---|
| Panache de bulle | L'obturateur de la lentille doit être tourné entre la position 2.8 et 4.0. Dans le logiciel, le paramètre «Sensor Gain» est fixé à +3dB; «Rate (Hz)» à 501; «Exposure [µs]» à 500; «Exposure Mode» à «Single»; «Dynamic range» à 8 Bit ; «Bining» à 1x1; «Pixel Depth» à 24 Bit (upper); ROI à (288,0) 1888x1720; «Record mode» à «Normal»; «Frames» à 100 ou 0,199601 s; «Frame Sync» à Internal; «Sync out» à «Configurable Width»; «Alignements» à «Align to exposure»; «Width» [µs] à 520 et «Delay» à 100. |
| Taille de bulle | L'obturateur de la lentille doit être tourné à la position 2.0. Dans le logiciel, le paramètre «Sensor Gain» est fixé à +3dB; «Rate (Hz)» à 1114; «Exposure [µs]» à 248; «Exposure Mode» à «Single»; «Dynamic range» à 8 Bit ; «Bining» à 1x1; «Pixel Depth» à 24 Bit (upper); ROI à (832,94) 752x776; «Record mode» à «Normal»; «Frames» à 100 ou 0,199601 s; «Frame Sync» à «Internal»; «Sync out» à «Configurable Width»; «Alignements» à «Align to exposure»; «Width» [µs] à 234 et «Delay» à 100. |

L'objectif pendant le déroulement d'un essai est de réaliser deux films ou acquisitions de données associées à ces deux configurations. De manière général, les films sont réalisés à mi-chemin de la durée de l'essai alors que le résultat de l'analyse photo est supposé décrire ce qui se passe en tout temps. C'est ce type de photos qui sert à caractériser chaque essai réalisé et qui constitue une base de données pouvant être analysée par la suite par traitement graphique. Pour ce faire, le logiciel gratuit DraftSight Version V1R.1.4 ©2011 de Dassault Systèmes tous droits réservés est utilisé. Ce dernier est un logiciel permettant d'importer des photos et de référer précisément un trait graphique suivant sa longueur. Chacun des fichiers films contient normalement 100 photos. L'objectif minimal est de choisir dans chaque fichier

film une photo qui sera traitée à l'aide du logiciel. Le choix est fixé au hasard en notant un chiffre de 0 à 99 dans la section du formulaire réservée au numéro de la photo choisie pour fin d'analyse. La photo de type «Panache de bulle» sert principalement à estimer à trois reprises la hauteur caractéristique du jet de bulle (H), la largeur caractéristique de ce même jet (L) et la dimension de référence incluse dans la photo pour fin de correction (RP). Il peut arriver à l'occasion qu'elle serve à estimer la taille d'une bulle (T) mais ce cas est principalement réalisé à partir de la photo de type «Taille de bulle». Sur ce dernier type de photo la dimension de référence (RT) est mesurée également à trois reprises. Cependant, pour estimer la taille moyenne des bulles (T) observées dans le jet, huit bulles bien distinctes sont choisies. Elles sont supposées appartenir à un même plan focal. La fenêtre utilisée pour choisir ces bulles a pour frontière la largeur du tuyau observé sur la photo. Ceci a également pour but de limiter l'effet d'aberration sphérique qui augmente en périphérie. En effet, le tuyau est positionné en ligne directe avec l'objectif de la caméra, là où la paroi de la colonne peut être considérée comme plane. L'ANNEXE VII donne un exemple de la façon dont les paramètres sont estimés sur les photos. Il faut mentionner que le traitement photo n'a pu être complété pour toutes les expériences et qu'à partir de la 5^e expérience en mode jet libre, seulement deux répétitions d'expérience sur trois sont traitées pour les photos. Pour terminer cette section, simplement préciser que l'essai de mesure du zéro ne nécessite pas l'utilisation de la caméra à capture rapide alors qu'aucune bulle significative n'est observée dans la zone de contact secondaire.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSE

4.1 Caractéristiques physiques

La figure 4.1 permet de visualiser dans quelles conditions expérimentales de débits d'eau et de gaz chaque expérience s'est déroulée. Les moyennes obtenues sont le résultat d'au minimum trois lectures réalisées sur les débitmètres durant chaque essai et suivant le nombre d'essai par expérience.

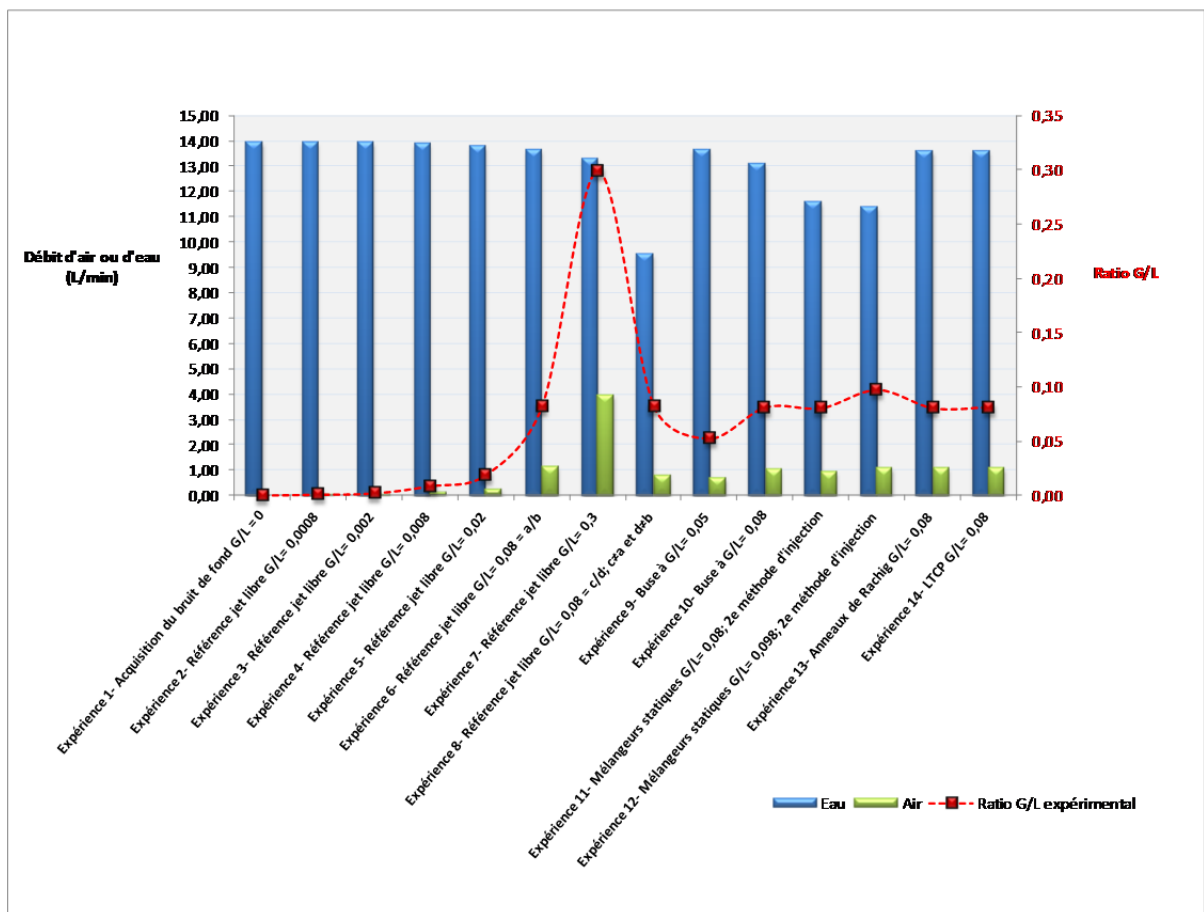


Figure 4.1 Débits d'eau, de gaz et ratio G/L (v/v) expérimentaux

Les ratios des débits Gaz/Liquide (G/L) expérimentaux coïncident relativement bien avec les valeurs prédéterminées mentionnées dans le titre des expériences. Cela témoigne de la capacité à bien contrôler les variables débit de gaz et d'eau sur le pilote lors des expérimentations. À titre d'exemple, le ratio de 0,08 explicité dans le titre de l'expérience #6 est atteint exactement avec une valeur de $0,082 \pm 0,003$; ce qui donne une erreur relative d'environ 4% (voir aussi ANNEXE VIII, p.190). Sur le graphique, les sept premières expériences du mode jet libre sans restriction sur le débit d'eau montre que le ratio G/L varie conséquemment à l'augmentation du débit d'air et dans une moindre mesure à la faible baisse du débit d'eau. En fait, l'observation à retenir lors de la mise en place d'une expérience suivant un ratio G/L donné est qu'en ajustant le débit d'air à la hausse; le débit d'eau maximum fourni par la pompe n'est pas constant mais s'ajuste à la baisse. Dans l'absolue, en considérant la pression atmosphérique et la température comme constantes; pour chaque débit d'air fixé, il existe un unique débit d'eau accessible pour la configuration du pilote; par conséquent, un unique ratio G/L associé à ce couple de valeurs (débit d'air; débit d'eau). À titre d'exemple; les sept premières expériences en mode jet libre représente l'unique ratio G/L accessible suivant l'augmentation du débit d'air. Mathématiquement, la relation entre le débit d'air fixé et le ratio G/L pour le mode jet libre sans restriction sur le débit d'eau est donc une fonction pour un mode donné. Ceci s'applique pour les autres modes testés dans ce travail. Une distinction pour l'expérience #8; le mode jet libre est physiquement conservé mais une restriction est appliquée sur le débit d'eau à l'aide d'une valve. Cette restriction peut également être vue comme un mode du pilote mais n'a pas été spécifiée en ce sens pour conserver l'emphase sur le mode jet libre. Cette expérience définit alors une nouvelle configuration du pilote mais le même ratio G/L accessible. Pour obtenir un ratio G/L de 0,08 similaire à l'expérience#6, le débit d'air a été fixé autour de $0,784 \pm 0,006$ L/min et le débit d'eau fourni par la pompe s'est ajusté finalement autour de $9,53 \pm 0,03$ L/min donnant un ratio G/L expérimental de $0,81 \pm 0,001$. Attention de ne pas se méprendre sur la possibilité que deux configurations données du pilote puisse avoir le même ratio G/L accessible en fonction du débit d'air fixé. Ce qu'il faut saisir c'est qu'en fixant tous les autres paramètres du pilote sauf le débit de gaz et d'eau; alors une seule courbe de ratio G/L est accessible pour ce mode particulier, car fixer le débit de gaz conditionne alors le débit d'eau.

Les débits d'eau présentés permettent de comparer les expériences en termes de temps de traitement pour un volume d'eau déterminé passant d'un réservoir à l'autre. Plus il est élevé plus le temps de traitement par essai est court. Le temps est un critère de performance. Voici une comparaison entre les différents modes fournie par le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Temps d'essai calculé pour un volume fixé de 300 L d'eau et un ratio G/L de 0,08

| Mode (Expérience) | Temps (min) |
|--|------------------------|
| Jet libre (#6) | 21,99 ± 0,03 |
| LTCP (#14) | 22,04 ± 0,03 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 22,07 ± 0,03 |
| Buse (#10) | 22,94 ± 0,05 |
| Mélangeurs statiques (#11) | 25,88 ± 0,06 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 31,47 ± 0,03 |

D'un autre côté, la courbe des débits d'air donne un aperçu du volume d'agent traitant (l'oxygène) qui est ajouté par minute, et moyennant conversion, de la masse utilisée. Pour comparer les expériences par rapport au volume total d'agent traitant utilisé pour 300 L d'eau, il suffit de multiplier par les temps calculés ci-haut. Cependant la courbe des ratios G/L expérimentaux contient en fait toute l'information associée à la masse d'oxygène ajoutée par litre d'eau traité et permet de comparer les expériences entre elles pour savoir laquelle a utilisé le plus d'agent traitant. La masse d'agent traitant utilisée au total est également un critère de performance. La figure 3.1 permet d'affirmer que l'expérience 7 est celle qui a consommé le plus d'oxygène au total et que les expériences ayant un ratio G/L de 0,08 ont consommé à peu près la même quantité.

La figure 4.2 permet de visualiser l'évolution des pressions d'eau et de gaz grâce aux différents manomètres du pilote. Le premier manomètre situé un peu avant l'injecteur donne

un aperçu du travail de la pompe pour monter l'eau en pression. Cette mesure est associée à la pression initialement mesuré sur le circuit d'eau tout autant qu'elle représente la différence entre la pression atmosphérique du réservoir d'eau d'essai, pression jaugée comme référence nulle, et la pression d'eau dans le tuyau juste avant l'injecteur venturi. Sur le graphique, la courbe en noire témoigne de ces pressions moyennes mesurées qui tournent autour de 300 ± 5 kPa pour chaque expérience (note : la précision donnée pour cette valeur correspond à la plus petite valeur de l'échelle du graphique.) En fait, les légères variations de pression observées dans le mode jet libre tout autant que celui de la buse, des mélangeurs, des anneaux de Rachig ou bien de la longueur du tuyau de contact primaire (LTCP) semble liées à la variation de la valeur de pression du gaz avant son entrée par le port de l'injecteur bien que l'influence est minime.

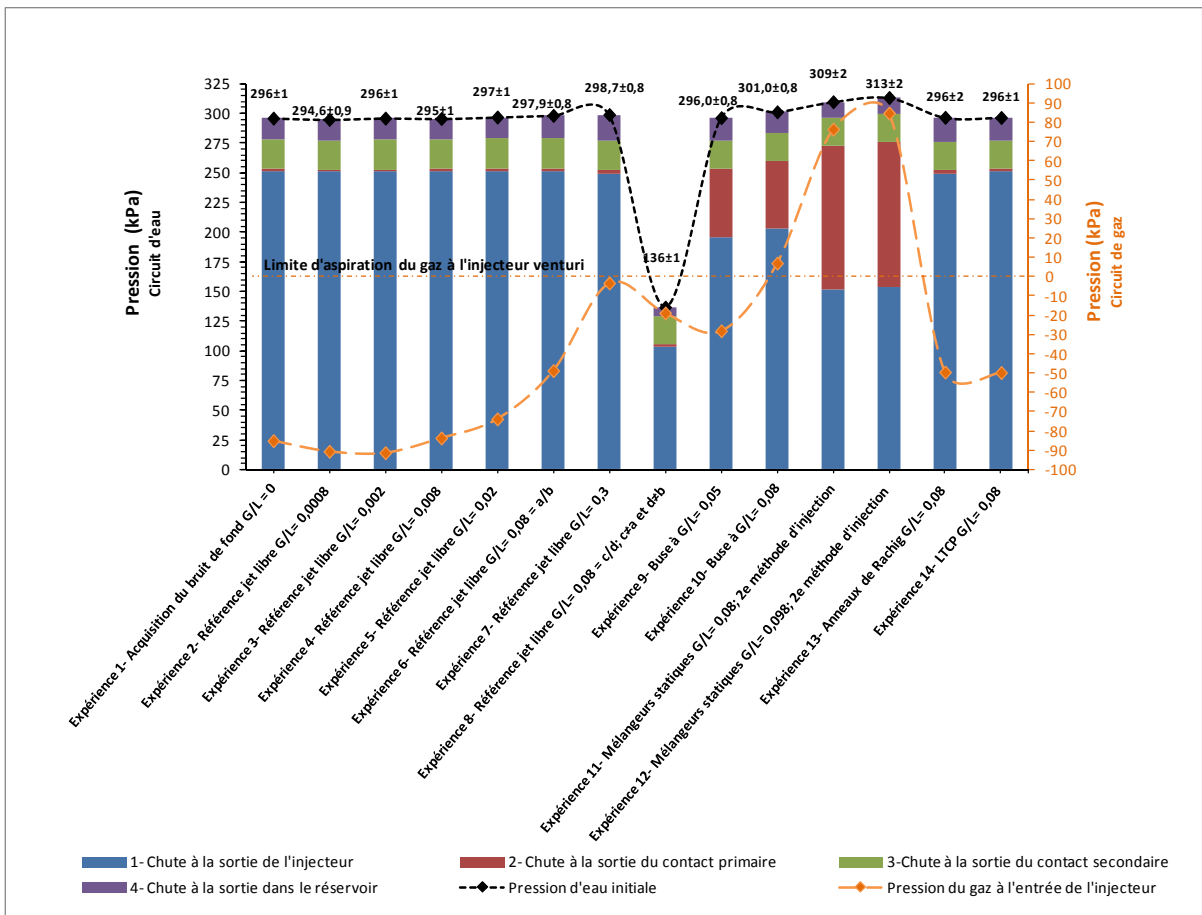


Figure 4.2 Distribution de la pression le long du circuit d'eau et pressions de gaz mesurés

Dans le mode jet libre, si la pression de gaz augmente mais demeure négative, la pression d'eau initiale associée au circuit augmente mais faiblement. Grossièrement, elle est de l'ordre de 3 ± 5 kPa pour une augmentation d'environ 80 ± 5 kPa de la pression du gaz. Si la pression du gaz devient positive, alors l'augmentation semble un peu plus importante dans le cas du mode buse et du mode mélangeurs. Elle est de l'ordre de 10 ± 5 kPa pour une augmentation de la pression du gaz de 80 ± 5 kPa. Le comportement des deux courbes se coordonne bien. D'un point de vue physique, cela est cohérent avec l'apport supplémentaire en pression amenée par le gaz dans la zone de l'injecteur. En raison du positionnement du manomètre dans le circuit, cette pression initialement mesurée est un indicateur de la pression d'eau maximale atteinte à la sortie de la pompe, sauf dans le cas de l'expérience-8

Référence jet libre $G/L = 0,08 = c/d \neq a/b$. Cette précision devient importante pour mieux expliquer la valeur de 136 ± 1 kPa mesurée. Dans cette expérience, la perte de charge la plus importante se produit juste après la valve utilisée pour restreindre le débit. Comme la valve est située avant le premier manomètre utilisé, cette perte de charge n'est pas mesurée adéquatement. Elle subroge l'indice associée à la pression maximale atteinte avant toute perte de charge importante. Cela donne l'impression sur le graphique que la pression maximale atteinte chute de moitié pour cette expérience. Ce n'est pas le cas. Un manomètre supplémentaire situé avant la valve aurait donc été nécessaire. Cependant, la chute de pression associée à la restriction du débit peut tout de même être évaluée sur le graphique. Elle correspond à la partie manquante pour atteindre les 300 ± 5 kPa similaires aux autres expériences et s'estime à environ 160 ± 5 kPa.

Un mot concernant la précision associée aux différentes valeurs présentées sur le graphique; elles sont semblables à celles explicitées sur la courbe des pressions initiales, sinon se référer à la section des pressions du tableau-A VIII-1 présenté à l'ANNEXE VIII. Un autre aspect intéressant de la figure est le comportement des pertes de charges ou chutes de pression tout le long du circuit d'eau. Les différents points de mesure associés aux positions des manomètres ont permis d'évaluer ces dernières. Elles sont représentées par les différentes colonnes. Cette partie de la figure insiste moins sur la valeur exacte, mettant l'emphasis sur l'évolution des colonnes d'une expérience à l'autre. Puisque l'on part d'un réservoir à

pression considérée nulle pour revenir à un autre réservoir à pression nulle, il est nécessaire que la somme des colonnes s'ajuste bien à la courbe en noire des pressions initiales observées. La courbe et les colonnes séparent le circuit d'eau en deux parties équivalentes. Cependant, les calculs réalisés pour les générer sont différents. La pression initiale du circuit correspond à la moyenne des lectures prises sur le manomètre alors que les colonnes sont des différences de moyennes des pressions mesurées aux différents manomètres. La somme cumulée des colonnes n'est donc pas la valeur utilisée et affichée sur la courbe en noire. Le circuit d'eau peut-être divisé en quatre zones principales où il y a une chute de pression ou perte de charge; sauf dans le cas de l'expérience #8 où une 5^e zone apparaît comme mentionné plus tôt due à la restriction sur la valve de contrôle du débit d'eau. La première colonne en partant du bas (en bleue) correspond à la perte de charge associée au passage à travers l'injecteur. La deuxième colonne suivant immédiatement (en rouge) est associée à la perte de charge dans le tuyau de contact primaire, de la sortie de l'injecteur au rejet à la base de la colonne d'eau. La troisième colonne (en vert) correspond à la perte de charge de la base de la colonne de contact secondaire jusqu'à la sortie extérieure de cette dernière. Finalement, la dernière colonne représente la pression résiduelle jusqu'au rejet de l'eau dans le réservoir. Le point important concerne la distribution de la pression tout le long du circuit observable grâce à ces colonnes du graphique. Pour le mode jet libre, l'augmentation du ratio G/L affecte peu ou pas le profil de distribution des chutes de pression. La perte de charge principale se produit à l'injecteur et s'estime grossièrement sur le graphique autour de 250 ± 5 kPa. Dans le cas de l'expérience #13, l'ajout des quelques 977 ± 1 anneaux dans la colonne d'eau ne produit pas d'effet notable concernant la chute de pression à la sortie du tuyau de contact primaire autant qu'à la sortie extérieur de la colonne de contact secondaire. Le profil de distribution des pressions demeure le même que le mode jet libre. Ceci est logique, car les anneaux restreignent en réalité très peu le volume de la colonne contrairement aux apparences et la résistance associée est très faible comme le débit moyen de l'expérience a pu le montrer la figure 4.1. De la même façon, le fait de raccourcir fortement le tuyau de contact primaire de $94 \pm 0,5$ cm à $25,5 \pm 0,05$ cm n'a pas changé le profil de distribution des chutes de pression. Cependant, il en va tout autrement pour les expériences #8, #9, #10, #11 et #12. Les changements de pressions sont directement liés aux modifications apportées au mode jet

libre, soit par la restriction du débit à l'aide de la valve, soit par l'ajout de la buse ou bien des mélangeurs statiques. Dans le cas de l'expérience #8, il a été mentionné que la perte de charge initiale entre la valve et l'entrée du manomètre est estimée à environ 160 ± 5 kPa sur la figure 4.2. Cependant, la valeur calculée de la chute de pression à l'injecteur est de 104 ± 2 kPa, contrairement à 251 ± 2 kPa pour l'expérience #6 en mode jet libre. Conséquemment, à la sortie de l'injecteur, la perte de charge totale est d'environ 264 ± 5 kPa, soit 13 kPa de plus que le 251 ± 2 kPa perdu dans l'expérience #6. Cette différence est compensée dans la valeur de la pression résiduelle (chute à la sortie dans le réservoir) qui est plus faible à $7,5 \pm 0,6$ kPa au lieu de 19 ± 2 kPa calculée dans l'expérience #6. En résumé, l'expérience #8 a une distribution plus uniforme des pertes de charges entre la sortie de la pompe et la sortie de l'injecteur par rapport aux autres expériences en mode jet libre. Cela peut également être vu comme une distribution plus uniforme des valeurs de pressions mesurées le long du circuit. Pour le mode buse et le mode mélangeurs statiques, la distribution de la perte de charge se fait cette fois entre l'injecteur et la sortie du tuyau de contact primaire (1^{re} et 2^e colonnes, bleu et rouge). Dans le cas de l'expérience #11 en mode mélangeurs, la chute de pression moyenne à la sortie du tuyau de contact primaire est de 122 ± 3 kPa alors que celle à l'injecteur est de 151 ± 4 kPa. Dans le cas de l'expérience #10 en mode buse, à la sortie du tuyau de contact primaire la chute de pression est de 56 ± 1 kPa alors qu'à l'injecteur elle est de $203,1 \pm 0,9$ kPa. Dans ces deux cas, c'est le mode avec mélangeurs qui distribue le mieux la perte de charge; donc qui présente un étalement des valeurs de pressions plus uniforme. Cet aspect devient très important et il faut le mettre en relation avec la performance d'oxygénation des expériences.

Par ailleurs, il y a une observation importante à souligner concernant la courbe de la pression du gaz à l'entrée de l'injecteur. Elle décrit la présence ou non d'aspiration vers le circuit d'eau due à l'effet venturi. Il y a aspiration lorsque la pression est inférieure à 0 kPa et refoulement lorsque la pression est positive. L'absence ou la diminution de l'aspiration est à mettre en relation avec la performance de dissolution de l'oxygène et particulièrement pour les expériences #10, #11 et #12 alors que la pression d'air est positive. En effet, ce sera explicité plus loin mais la performance de dissolution augmente avec l'augmentation de la

pression à l'entrée de l'hydro-injecteur, bref avec une chute de l'aspiration. Ceci sera repris dans la discussion synthèse. Cette perte d'aspiration est d'ailleurs à l'origine de la mise en place d'une deuxième méthode d'injection du traceur puisque le refoulement d'air empêchait la solution d'être aspiré d'un seul trait.

La figure 4.3 témoigne de la désoxygénation de l'eau d'essai initial d'une expérience à l'autre.

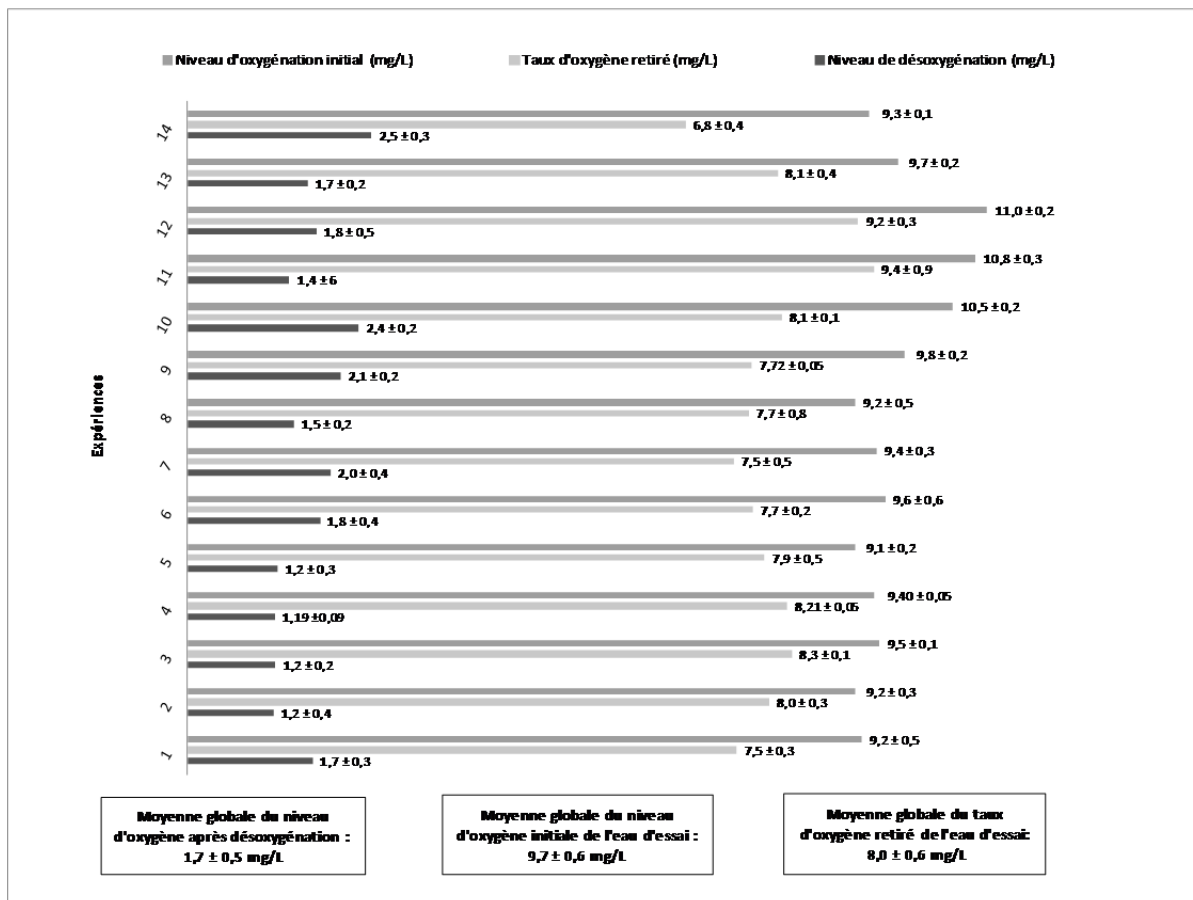


Figure 4.3 Désoxygénation de l'eau d'essai initial

Elle permet de constater que les expériences #10, #11 et #12 présentent un taux d'oxygène initial dans l'eau nettement plus élevé en moyenne que les autres expériences. Il faut noter que la température moyenne de l'eau obtenue pour ces expériences (voir ANNEXE VIII, p.189) ne se distingue pas réellement des autres et n'explique pas le résultat. Ce graphique

montre que désoxygéner l'eau d'essai de façon identique est un aspect difficile du protocole d'expérience. Cependant, certaines précisions obtenues de l'ordre du centième de mg/L indiquent qu'il est possible d'améliorer cet aspect des expérimentations de façon importante. Il est difficile de conclure à la similitude de la désoxygénation pour chaque expérience afin de faciliter la comparaison. En examinant les valeurs du niveau moyen d'oxygène de l'eau d'essai après désoxygénation, il n'est pas évident de considérer toutes les moyennes comme statistiquement similaires. La plupart des intervalles s'entrecroisent, mais pas tous l'un par rapport à l'autre. En abaissant de manière raisonnable le pourcentage de confiance sur l'intervalle de précision, il y aura plus de valeurs qui vont se distinguer les unes des autres. Étant donné ce manque de précision, une autre approche est adoptée afin de valider l'hypothèse de similarité. Il s'agit d'évaluer à quel point les écarts sur le taux de désoxygénation mesuré d'une expérience à l'autre affectent les écarts mesurés sur les fractions des taux d'oxygène recouverts. Ceci explique la présence des figures 4.12, 4.13 et 4.14 et sera approfondi dans la section validation des résultats. Ces figures confirment que l'hypothèse de similarité est raisonnable et appuient les résultats obtenus. Ceci explique également l'approche par ratio recouvert d'oxygène adoptée dans la présentation des résultats de réoxygénation. L'objectif est de minimiser l'erreur possiblement associée à une mauvaise désoxygénation d'une répétition à l'autre en supposant que le taux d'oxygène dissout lors d'une étape de traitement s'ajuste en conséquence de la masse en oxygène retirée. Ainsi le ratio de l'un sur l'autre (fraction recouverte) devient caractéristique de l'étape de traitement et demeure la même malgré les différences observées d'une répétition à l'autre. En terminant, pour faciliter la comparaison entre les expériences, il est utile de référer à des moyennes générales concernant la désoxygénation. Il y a tout d'abord le taux d'oxygène initial dans l'eau d'essai qui est en moyenne pour toutes les expériences réalisées de $9,7 \pm 0,6$ mg/L. Cette valeur donne de l'information sur l'intervalle dans lequel a varié le niveau d'oxygène initial de l'eau d'essai pour une température corrigée à 23°C . Une fois désoxygénée, le niveau d'oxygène moyen se situait autour de $1,7 \pm 0,5$ mg/L. Finalement, la moyenne du taux d'oxygène retirée de l'eau d'essai est de $8,0 \pm 0,6$ mg/L. Ces trois valeurs sont en lien avec trois aspects fondamentaux qui peuvent influencer à priori la dissolution et la performance de réoxygénation soit la quantité de sulfites ajoutés et la modification chimique associée,

l'espace occupée initialement par l'oxygène dans le milieu et la quantité d'oxygène traitant nécessaire à ajouter pour combler l'espace disponible.

La figure 4.4 témoigne du travail accompli à l'aide de la caméra à capture rapide pour décrire les caractéristiques associées aux bulles observées dans la zone de contact secondaire. Cette figure montre l'augmentation de la taille moyenne des bulles en fonction de l'augmentation du ratio G/L dans le mode jet libre de référence.

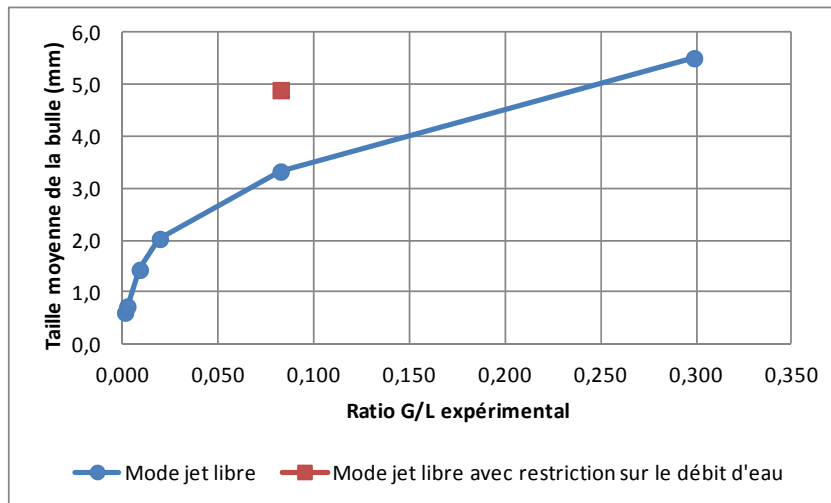


Figure 4.4 Taille moyenne des bulles observées en mode jet libre suivant l'augmentation du ratio G/L

Les données ont été estimées à partir de l'analyse des résultats photos obtenus tels que ceux présentés à la figure 4.5 et 4.6.

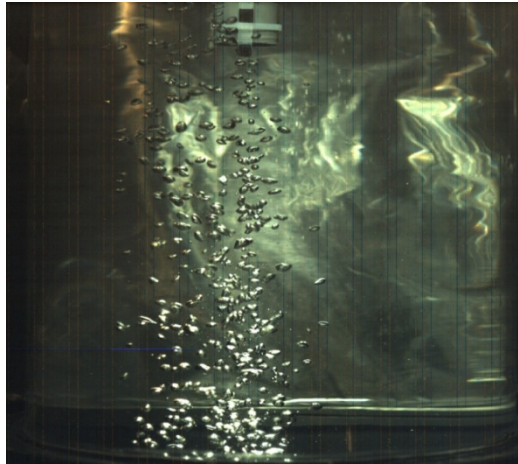


Figure 4.5 Photo de type «Panache de bulle» tiré de l'expérience #6 en mode jet libre pour un ratio G/L de 0,08

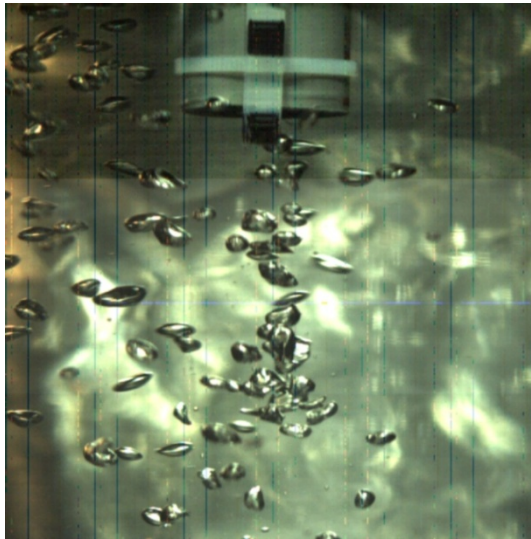


Figure 4.6 Photo de type «Taille de bulle» tiré de l'expérience #6 en mode jet libre pour un ratio G/L de 0,08

Tout d'abord, concernant la caméra haute-vitesse, le traitement de l'énorme base de données des dossiers films établis pour chaque essai s'avère un trop gros projet en lui-même. La méthode de traitement graphique développée, malgré sa simplicité, demande du temps. Les résultats obtenus sont physiquement réalistes, mais il faut rendre moins subjectif et encore plus systématique l'évaluation des différents paramètres visés. Dans le cas des paramètres de hauteur et de largeur du panache de bulles, leur évaluation devient rapidement ardue et pratiquement inutile, alors que les changements observés dépendent de l'impression de

l'observateur et de son choix de trait. L'autre aspect est qu'il aurait été préférable d'analyser plusieurs photos pour augmenter la reproductibilité de l'estimation; mais le facteur temps a influencé ce choix. C'est ainsi que le travail quantitatif sur ces deux premiers paramètres est un aspect abandonné. Il reste alors la taille moyenne des bulles qui demeure un paramètre pertinent à titre exploratoire. Ce dernier a été au minimum évalué pour les huit premières expériences en mode jet libre. Les valeurs de la figure 4.4 avec leurs incertitudes sont accessibles à l'ANNEXE VIII à la toute fin du tableau synthèse. Les grandeurs physiques calculées sont réalistes et il y a de l'information simple et cohérente qui peut être tirée. Tout d'abord, la taille moyenne des bulles augmente avec l'augmentation du débit de gaz et donc du ratio G/L. Elle commence à l'expérience #2 à $0,6 \pm 0,1$ mm pour finir à une taille de $5,5 \pm 0,9$ mm avec l'expérience #7. Ensuite, fait intéressant, ralentir le débit d'eau et abaisser le débit de gaz pour conserver un ratio de G/L de 0,08 semble favoriser cette fois une taille de bulle plus grande à l'expérience #8 ($4,9 \pm 0,3$ mm) qu'à l'expérience #6 ($3,3 \pm 0,3$ mm). Pourtant, l'expérience #8 sera jugée plus performante par rapport à sa capacité à dissoudre que l'expérience #6. Ceci questionne l'association usuelle faite entre petites bulles et meilleure capacité à dissoudre. Mais il faut mettre beaucoup de réserve sur ces résultats. En effet, l'incertitude croissante observée sur les moyennes obtenues témoigne de la limite de la technique d'analyse photo développée. En effet, plus le ratio G/L augmente, plus le nombre de bulles fait de même et plus ces dernières sont irrégulières et de tailles variées. L'analyste essaie de tenir compte de ces facteurs mais le choix devient trop arbitraire avec seulement huit bulles analysées. De plus l'irrégularité de certaines bulles impose également un choix quant au trait tiré pour estimer le diamètre, ce qui ajoute à l'incertitude. Comme plusieurs tailles de bulles sont observables, il faudrait pondérer ces bulles dans la fenêtre de mesure choisie pour l'analyse.

4.2 Capacité à oxygéner

Dans le cadre des expériences, c'est une situation de déséquilibre thermodynamique qui est étudiée, alors que l'eau d'essai une fois désoxygénée cherche naturellement à s'oxygéner pour retrouver l'équilibre. Le processus d'oxygénation est alors accéléré par son passage mécanique dans le pilote et la cinétique du retour à l'équilibre est indirectement présentée à travers les graphiques. Ainsi, les figures 4.7 à 4.9 permettent de caractériser le transfert dynamique d'oxygène lors du mélange entre la phase liquide et gazeuse en fonction de sa propre présence en masse dans le milieu et ce, à chaque traitement successif nécessaire pour revenir à saturation.

La figure 4.7 décrit d'abord le comportement de chaque expérience suivant la performance de dissolution de l'oxygène par rapport à la masse initialement retirée de l'eau d'essai. Il faut l'analyser dans la perspective d'un traitement global d'eau, mais séparé en unité de traitement successive. Une unité de traitement est l'équivalent d'un passage complet d'un volume d'eau déterminé à travers le pilote pour revenir dans un autre réservoir. Le mot essai est également utilisé pour décrire ce passage d'un volume d'eau dans le pilote. La figure décrit à la fois le nombre de traitement pour arriver à la saturation et la fraction de la masse initialement retirée qui est recouverte à chacun de ces traitements. La méthode de calcul pour arriver aux courbes présentées consiste à prendre la masse moyenne d'oxygène dissous à chacun des essais et de la diviser par la masse moyenne d'oxygène retirée lors de l'essai de désoxygénation de l'eau pour la répétition associée de l'expérience. Chaque expérience étant répétée dans la mesure du possible trois fois, la moyenne pour ces trois répétitions d'une même unité de traitement (exemple, le 2^e traitement) est calculée et représente le point de mesure utilisé pour la courbe. Il est nécessaire de rappeler que la masse moyenne d'oxygène dissous est une moyenne de valeurs expérimentales corrigées à une température de référence exacte de 23 °C.

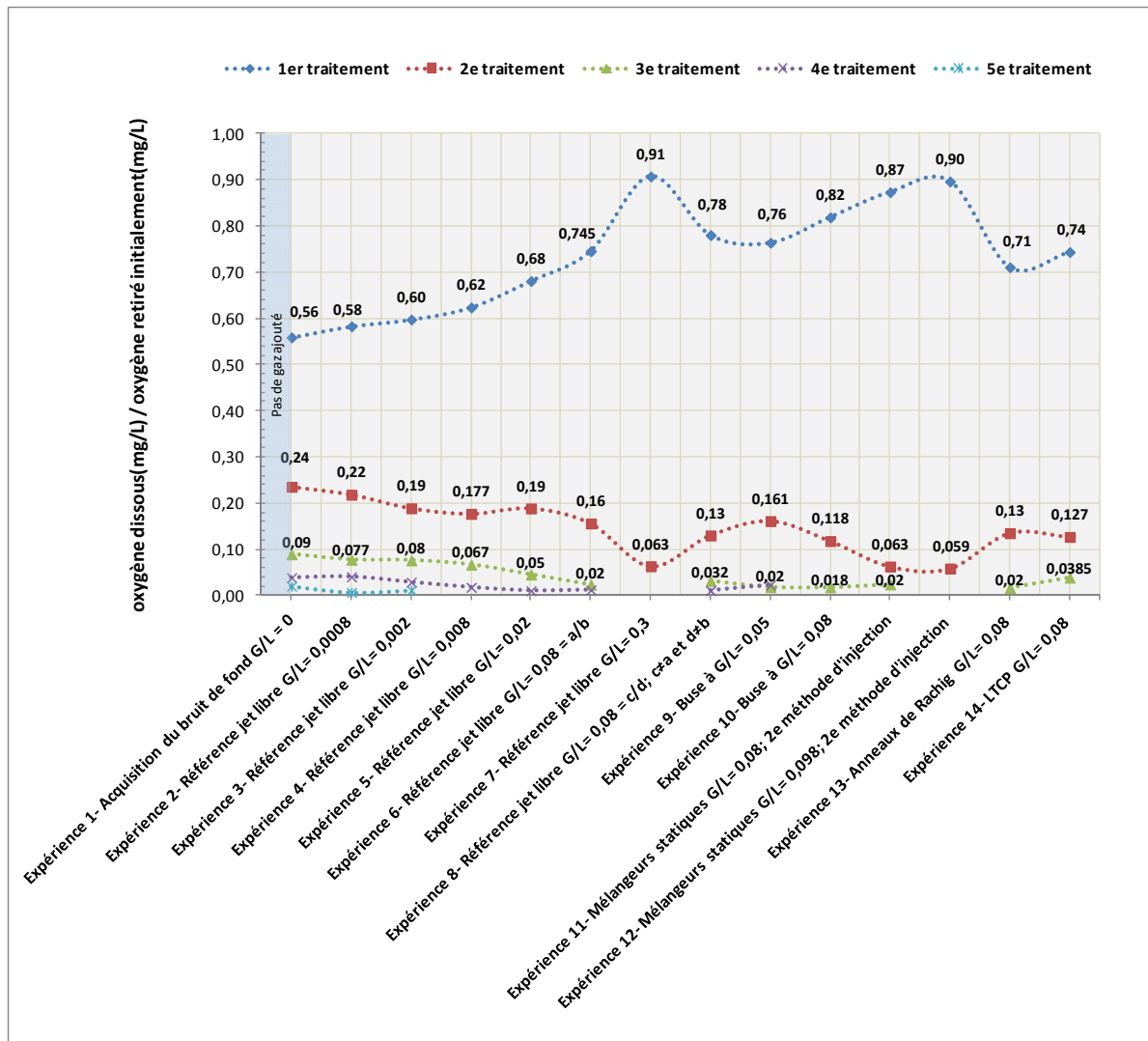


Figure 4.7 Fraction recouverte à chaque traitement de la quantité d'oxygène retirée initialement

Pour reproduire par l'expérience ce graphique tout autant que de l'interpréter adéquatement, il est utile de se remémorer le taux et le niveau de désoxygénation moyens visés avant le premier traitement d'oxygénation. Ceci explique les moyennes globales de la figure 4.3 qui sont utilisées à cette fin. Ces dernières caractérisent la masse d'oxygène que l'on cherche à retirer de l'eau d'essai à chaque répétition d'une expérience en ajoutant le sulfite de sodium et elle représente le niveau de désoxygénation supposé identique au début de tous les premiers traitements. L'importance de la précision obtenue sur la valeur de désoxygénation

initiale sera traitée plus en profondeur dans la section de la validation des résultats tout comme les incertitudes associées à la figure 4.7 et 4.8.

La figure 4.7 doit être interprétée de la façon suivante. Tout d'abord, la courbe du premier traitement permet de comparer les expériences l'une par rapport à l'autre en ce qui a trait à leur capacité à dissoudre de l'oxygène. Cette comparaison devient possible car, comme spécifié précédemment, le point de départ de l'eau désoxygénée est supposé le même. Ce même raisonnement ne s'applique pas aux autres courbes associées aux traitements successifs; sauf si la performance de recouvrement après un premier traitement a été sensiblement la même. La figure 4.8 traitera davantage de cette question. Le premier traitement permet de valider que plus le ratio G/L est élevé plus la fraction de l'oxygène recouvrée est élevée. Ceci s'observe autant dans le mode jet libre de référence que pour celui de la buse ou des mélangeurs. En termes simples, pour un même mode alors que seul le débit d'air subit volontairement une modification d'une expérience à l'autre, plus la masse d'agent traitant par litre d'eau traité est grande ou encore, plus la phase gazeuse est importante par rapport à la phase liquide dans le mélange et plus la fraction de l'oxygène recouvré sera grande donc la masse d'oxygène dissous élevée (taux de dissolution). À titre d'exemple, dans le mode jet libre, l'expérience #6 avec un ratio G/L de 0,08 recouvre après un premier traitement $0,745 \pm 0,005$ fois la masse d'oxygène initialement retirée comparativement à $0,91 \pm 0,1$ fois pour un ratio de 0,3 dans l'expérience #7. Dans le mode buse, l'expérience #9 recouvre une fraction de la masse d'oxygène retirée de $0,76 \pm 0,03$ pour un ratio G/L de 0,05 alors qu'en augmentant le ratio G/L à 0,08 dans l'expérience #10, c'est une fraction de $0,82 \pm 0,01$ qui est obtenue. Même comportement dans le mode mélangeurs statiques, l'expérience #11 a un ratio de 0,08 et la fraction recouvrée est de $0,87 \pm 0,02$. En augmentant à un ratio G/L de 0,098 dans l'expérience #12, la fraction recouvrée est de $0,90 \pm 0,01$. La précision est suffisante pour bien distinguer les moyennes et considérer qu'elles sont différentes. Noter le fait que l'expérience #12 en mode mélangeur obtient une performance similaire à l'expérience #7 en mode jet libre alors que le ratio G/L est trois fois moins important. D'un autre côté, la courbe des deuxièmes traitements est le reflet inverse de la courbe des premiers traitements, c'est-à-dire que plus le taux de recouvrement a été important au premier

traitement moins il l'a été au deuxième traitement, les pics des courbes s'opposent. De plus les taux de recouvrement de manière général diminuent à chaque traitement successif. Bref le recouvrement de la masse d'oxygène retirée ne se distribue pas de manière constante mais diminue en masse à chaque traitement. Ceci s'explique alors que le taux de dissolution dépend de la quantité d'oxygène déjà présente dans l'eau d'essai et plus il y en a lors d'un traitement, plus il est difficile d'en dissoudre une quantité supplémentaire au traitement suivant. Même si la quantité d'oxygène ajoutée par litre d'eau traité demeure constante, les expériences ne dissolvent pas la même masse d'oxygène à chaque traitement. Cette variation du taux de dissolution est associée à la capacité à dissoudre d'une expérience et elle diminue à chaque traitement successif. Ceci insiste de nouveau sur l'importance de tenir compte du niveau d'oxygénation de l'eau lors de la comparaison d'un traitement par rapport à un autre et d'une expérience à l'autre. Il faut garder une perspective d'ensemble. Ainsi, il ne serait pas cohérent à partir de ce graphique d'affirmer par exemple qu'au deuxième traitement, l'expérience #2 avec un taux de recouvrement de la masse initiale de $0,22 \pm 0,02$ est plus «performante» que l'expérience #7 avec sa fraction de $0,063 \pm 0,005$. Certes, elle dissout plus d'oxygène au deuxième traitement; mais il faut raffiner la notion de performance. En effet, puisqu'au premier traitement l'expérience #7 dissout 91% de la masse d'oxygène initialement retirée, il ne reste alors que 9% de cette masse qui peut être ajoutée au deuxième traitement alors que pour l'expérience #2, il reste plutôt 44% de cette masse à dissoudre. Ainsi au deuxième traitement, les deux expériences ne se retrouvent pas au même point de comparaison sur la courbe naturelle de la capacité de l'eau à dissoudre de l'oxygène. Il faut donc évaluer un aspect supplémentaire en tenant compte du taux de recouvrement en oxygène par rapport à la quantité d'oxygène restante pouvant être ajoutée pour saturer l'eau à chaque traitement.

La figure 4.8 s'attarde sur l'évolution de la capacité de chaque configuration du pilote à maintenir ou non un excellent taux de recouvrement à chaque traitement successif, en prenant cette fois comme dénominateur la quantité restante d'oxygène pouvant être dissoute.

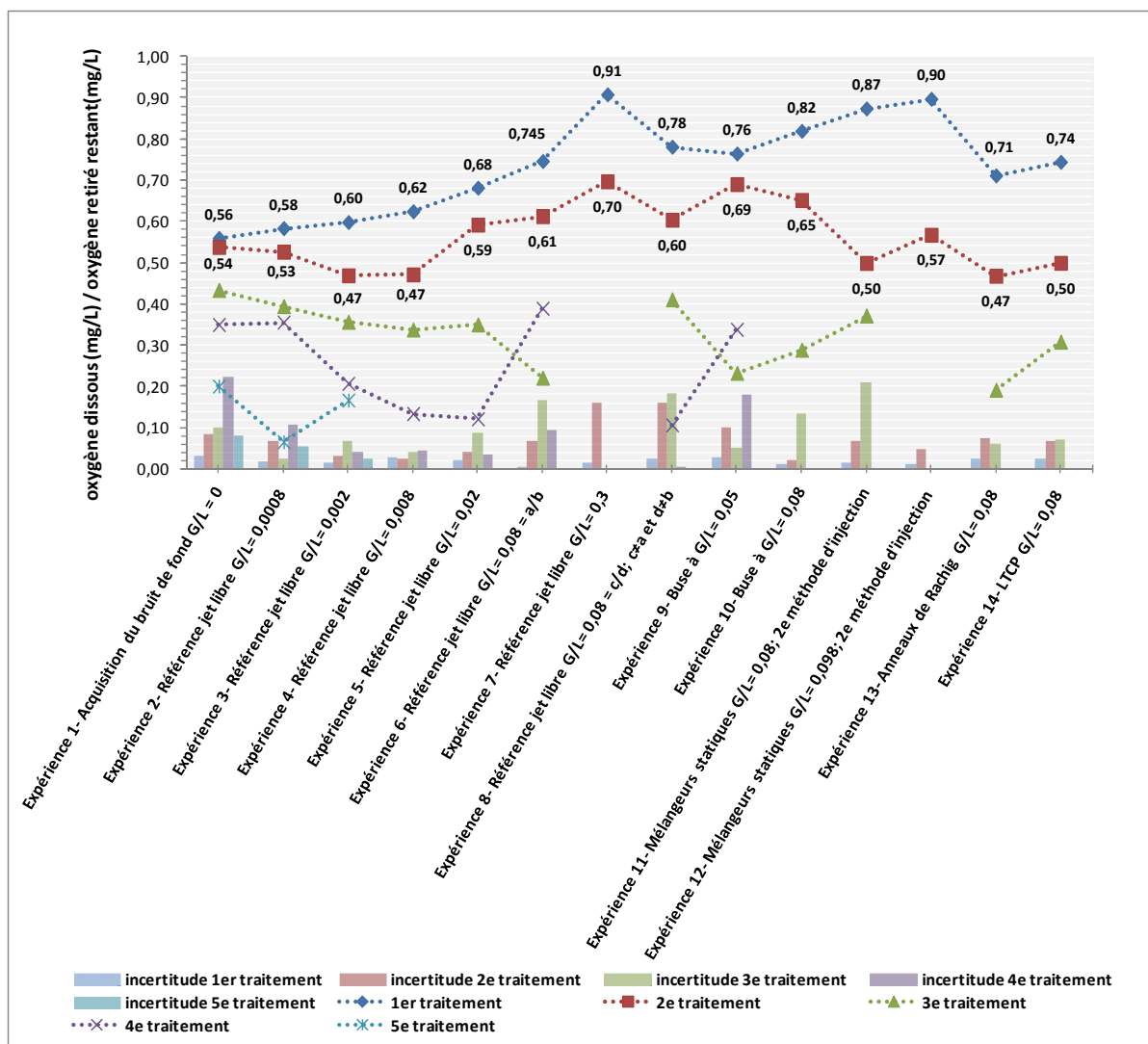


Figure 4.8 Fraction recouverte à chaque traitement de l'oxygène retiré restant

Mathématiquement, la figure contient implicitement de l'information à la fois sur comment varie le taux de dissolution en fonction du temps qu'en fonction du niveau d'oxygénation de l'eau d'essai. Les résultats sont obtenus de la façon suivante : pour chaque essai la masse moyenne d'oxygène dissous est divisée par le reste non recouvert de la masse d'oxygène initialement retirée. Finalement, la moyenne par traitement est calculée suivant le nombre de répétition de l'expérience. Les résultats confirment l'évidence que le taux de dissolution n'est pas une propriété constante; il diminue dans le temps ou à chaque traitement successif. Ceci montre l'influence du niveau d'oxygénation du milieu sur la capacité à dissoudre

davantage d'oxygène à chaque étape de traitement. L'idéal de performance serait d'arriver à limiter cette contrainte naturelle à l'aide d'une configuration spécifique du pilote. De plus, la capacité à maintenir un taux de dissolution élevé tout le long du processus d'oxygénation diffère d'une expérience à l'autre. Cependant, si une configuration présente une meilleure capacité à dissoudre après un premier traitement, cet avantage se maintient à peu de chose près jusqu'à la saturation. Il est donc possible de caractériser chaque expérience l'une par rapport à l'autre. Dans la figure 4.8, il faut rappeler qu'à partir du deuxième traitement, la comparaison entre les fractions recouvrées présentées ne se fait pas directement, car il faut tenir compte du point de départ du niveau d'oxygénation de l'eau d'essai ou dit autrement, du résultat obtenu au traitement précédent. Cependant, en observant la figure, un critère simple permet d'affirmer qu'une expérience est en comparaison globalement plus performante tout le long du processus d'oxygénation. Il s'agit d'observer si elle maintient à chaque traitement successif une fraction recouverte supérieure ou égale. À titre d'exemple, l'expérience #7 Référence jet libre $G/L = 0,3$ recouvre au deuxième traitement une fraction de $0,70 \pm 0,16$ du 9% de la masse en oxygène restante pouvant être dissoute après le premier traitement. En comparaison, l'expérience #6 Référence jet libre $G/L = 0,8 = a/b$ recouvre $0,61 \pm 0,07$ du 25,5% de la masse en O_2 soluble restante. En ramenant le tout à une masse restante similaire tournant autour de 9%, l'expérience #6 est nécessairement moins performante que l'expérience #7. En fait, en se référant à la figure 4.7 ou encore plus simplement à la figure 4.9 qui explicite directement le niveau d'oxygénation cumulée après chaque traitement, il est possible de l'évaluer. Au troisième traitement de l'expérience #6, la masse restante en O_2 pouvant être dissoute est de l'ordre de 9,5% et la fraction dissoute de celle-ci est de $0,35 \pm 0,09$; soit la moitié inférieure aux taux de recouvrement de l'expérience #7 à ce niveau d'oxygénation. Il est alors possible de conclure que l'expérience #7 a un meilleur pouvoir de dissolution que l'expérience #6 tout au long du processus d'oxygénation.

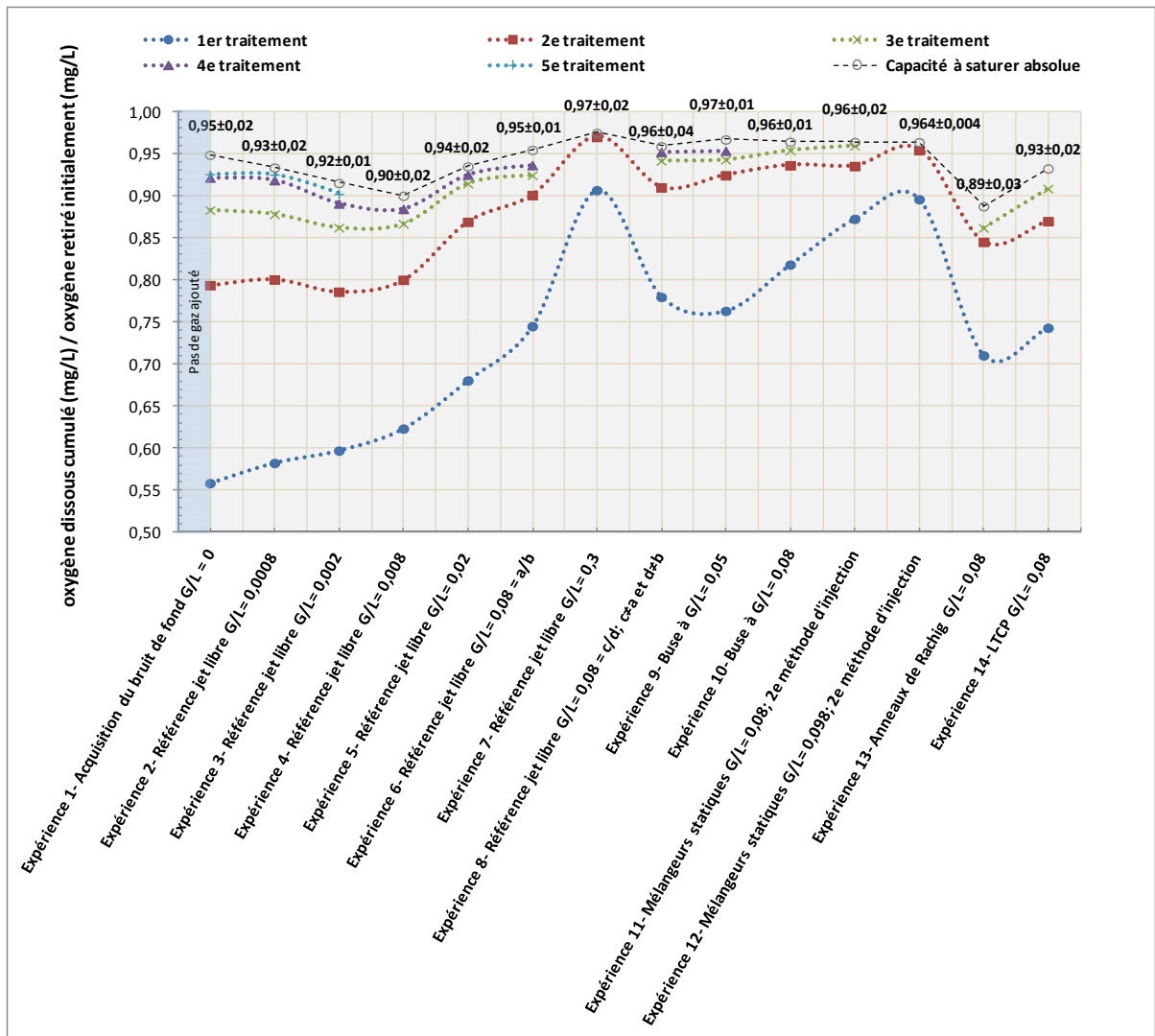


Figure 4.9 Fraction recouverte cumulée de l'oxygène initialement retiré

Toujours suivant la figure 4.8, le dernier exemple en mode jet libre met de nouveau en lumière que l'augmentation du ratio G/L semble améliorer la capacité à dissoudre autant que son maintien dans le temps. Cette observation se généralise aux autres modes du pilote. Dans le cas avec les mélangeurs statiques, l'expérience #12 à G/L= 0,098 maintient au deuxième traitement un taux de recouvrement de $0,57 \pm 0,05$ du 10% de la masse restante en O₂ soluble alors que l'expérience #11 à G/L = 0,08 recouvre $0,50 \pm 0,07$ pour une masse restante similaire de 13%. Évidemment comme l'expérience #12 maintient un taux de dissolution plus élevé également au deuxième traitement elle possède et maintient une

meilleure capacité à dissoudre que l'expérience #11. Dans le cas du mode buse, les mêmes conclusions s'appliquent mais nécessitent un peu plus d'analyse. Tout d'abord, la performance de dissolution est nettement supérieure au premier traitement pour l'expérience #10. Cependant, cette dernière ne présente pas sur la figure 4.8 un taux de dissolution supérieur au deuxième traitement. Cette fois, il n'est pas possible de conclure rapidement, bien que la faible différence observée entre le taux de dissolution de $0,65 \pm 0,02$ de l'expérience #10 à ratio G/L= 0,08 et celui de $0,69 \pm 0,10$ de l'expérience #9 à G/L=0,05 permet déjà d'estimer qu'à tout le moins, l'expérience #10 maintient une performance équivalente. En effet, en supposant au début du deuxième traitement un niveau d'oxygénation de l'eau similaire à celui de l'expérience #9, soit $0,76 \pm 0,03$ fois la masse d'O₂ initialement retirée ou si préféré que l'eau est saturée à 76 ± 3 %; dès lors, la configuration de l'expérience #10 aura un taux de dissolution pour cette unité de traitement simulé assurément supérieur ou égale à son $0,65 \pm 0,02$. La question est de savoir s'il sera plus élevé que celui de l'expérience #9 de $0,69 \pm 0,10$. Une simple règle des proportions permet de l'estimer grossièrement utilisant le fait que pour une masse restante en O₂ soluble de 18% le taux a été de 0,65, alors que pour une masse restante de 24% en O₂ soluble, le calcul donne un taux de 0,87 de loin plus élevé que 0,69. Ceci appuie l'idée que l'expérience #10 maintient une capacité de dissolution supérieure. Finalement, en combinant ces observations avec le fait qu'au troisième traitement, l'expérience #10 obtient un taux de $0,29 \pm 0,13$ supérieur à celui de l'expérience #9 de $0,23 \pm 0,05$ alors que son niveau d'oxygénation est plus élevé au départ du troisième traitement, ceci confirme que l'expérience #10 a et maintient une meilleure capacité à dissoudre en lien avec le fait que son ratio G/L est plus élevé. Cette conclusion est renforcée par le fait que l'expérience #10 n'a nécessité que trois traitements comparativement à quatre pour l'expérience #9. Ce critère sera d'ailleurs discuté ci-après, mais entretemps, il faut questionner la précision obtenue sur les taux de recouvrement, présentée sous forme de colonnes sur le graphique. Cette dernière n'est pas très bonne en moyenne à partir du deuxième traitement et remet en question certaines valeurs ou comportements obtenus. Par exemple, concernant la courbe des deuxièmes traitements, pourquoi une chute des taux de dissolution est observée pour l'expérience #2 et #3 alors qu'à partir de l'expérience #4 le taux recommence à croître à

chaque expérience successive en mode jet libre? Est-ce un comportement réel de la courbe ou un effet de l'imprécision sur les moyennes? Cet aspect intéressant questionne l'existence d'un « point de virage » où l'augmentation de la quantité d'agent traitant ou du ratio G/L vient compenser suffisamment la diminution de la capacité à dissoudre par rapport à un standard naturel, qui dans le cas présent est représenté par l'expérience #1 traité comme le bruit de fond. Ce cas sera discuté plus avant dans l'analyse de la figure 4.9. L'autre exemple à souligner concerne les taux de dissolution supérieurs du quatrième traitement pour l'expérience #5 et #9 par rapport à leur troisième traitement, produisant une inversion inattendue. Dans ce cas, la qualité des données associées à ces valeurs peut être mise en cause.

Autrement, il faut mentionner une conséquence logique associée au fait de maintenir une capacité de dissolution plus grande à mesure que l'on s'approche de la saturation. Nécessairement, le traitement global de l'eau d'essai nécessitera moins de passage dans le pilote. Cela s'observe dans l'expérience #7 qui, après deux passages en moyenne, ramène l'eau à saturation par rapport à trois passages dans l'expérience #6. Bien que la différence soit limitée dans le mode avec mélangeurs statiques, l'expérience #12 ne nécessite que deux passages par rapport à trois passages pour l'expérience #11. Dans le mode buse, l'expérience #9 nécessite quatre passages alors que l'expérience #10 en nécessite trois. Le nombre de traitement est donc un indicateur de performance qui donne de l'information en termes de capacité de dissolution autant qu'en termes de temps et de manipulations associés au traitement. Dans les trois modes décrits avant, il est observé que la diminution du nombre de passage s'associe également à l'augmentation du ratio G/L ce qui rejoint l'observation qu'un ratio G/L élevé favorise le maintien d'une bonne capacité de dissolution à mesure que l'on s'approche de la saturation. Il faut être prudent cependant avant de lier directement le temps global de traitement et le nombre total de traitement pour comparer les expériences. Pour un nombre de traitement égal sur la figure, la discrimination est simple car il suffit de comparer les débits d'eau de la figure 4.1 pour savoir quelle expérience dure plus longtemps; sinon, il est nécessaire de calculer le temps cumulé tel que présenté au tableau 4.2.

Tableau 4.2 Temps d'expérience cumulé pour ramener à saturation un volume de 300 L d'eau à un ratio G/L de 0,08

| Mode (Expérience) | Nombre moyen d'essais | Temps cumulé (min) |
|--|------------------------------|---------------------------|
| LTCP (#14) | 3 | 66,12 ± 0,09 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 3 | 66,21 ± 0,09 |
| Buse (#10) | 3 | 68,8 ± 0,2 |
| Mélangeurs statiques (#11) | 3 | 77,6 ± 0,2 |
| Jet libre (#6) | 4 | 88,0 ± 0,2 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 4 | 125,9 ± 0,1 |

Il faut se rappeler que ce temps cumulé est le temps global nécessaire pour ramener à saturation le 300L d'eau d'essai désoxygénée, mais de façon séquentielle en faisant passer l'eau d'un réservoir à un autre. Noter également que les deux premiers éléments du tableau sont sujets à discussion en raison d'un taux d'oxygénation finale observé à la figure 4.9 plus bas que les autres expériences, impliquant aussi un nombre de traitement moyen plus bas.

La figure 4.9 permet quant à elle de comparer directement les expériences l'une par rapport à l'autre à chaque étape de traitement. Elle décrit la progression vers la saturation en explicitant le taux de recouvrement cumulée de l'oxygène initialement retirée de l'eau d'essai. Il est possible par exemple d'identifier quelle expérience après deux traitements présente le niveau d'oxygénation le plus élevée, référé à un niveau de désoxygénation initial identique établi à $8,0 \pm 0,6$ mg/L. Dans le cas présent, c'est l'expérience #7 suivi de près par l'expérience #12. Elle permet également, en étant combinée à l'analyse des figures 4.7 et 4.8, d'établir un ordre qualitatif de la performance des différentes configurations testées à travers les expériences par rapport à leur capacité à dissoudre en se référant à un ratio G/L de 0,08. L'ordre est le suivant du plus performant au moins performant.

Tableau 4.3 Ordre qualitatif de performance des différents modes du pilote pour un ratio G/L de 0,08 par rapport à leur capacité à dissoudre

| Mode (Expérience) | Ordre 1-plus performant |
|--|------------------------------------|
| Mélangeurs statiques (#11) | 1 |
| Buse (#10) | 2 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 3 |
| LTCP (#14) | 4 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 5 |
| Jet libre (#6) | 6 |

Tout d'abord, il y a le mode avec mélangeurs statiques (#11) suivi de très près par le mode buse (#10). La fraction recouverte de ces deux expériences se distinguent nettement du lot après un premier traitement. Cependant, fait très intéressant, l'expérience #8 en mode jet libre où le débit d'eau a été restreint est la troisième en liste, et pas très loin derrière les deux premières. Les autres expériences se distinguent moins facilement les unes des autres et pourraient être considérées dans l'immédiat comme sensiblement équivalentes. Cependant, en considérant le nombre inférieur de traitement comme indicateur supplémentaire de la capacité à dissoudre, il est logique de considérer que le mode jet libre LTCP (#14) est le quatrième mode en terme de capacité à dissoudre, suivi par le mode jet libre avec anneaux de Rachig (#13) pour finalement se terminer avec le mode jet libre de base (#6). Il faut noter la distinction sans équivoque, malgré les précisions des résultats entre l'expérience #6 et #8. Ainsi comment expliquer cette différence? La réponse à cela semble provenir de la restriction sur le débit qui augmente le temps de contact entre les deux phases liquide et gazeuse. Ceci sera élaboré davantage dans la discussion synthèse.

La figure 4.9 invalide également l'idée que les expériences aient toutes la même capacité à saturer. Dans tous les cas l'oxygène initialement retirée n'est pas entièrement recouvert et diffère pour certaines expériences. En fait, le graphique admet que pour une eau d'essai aux propriétés physiques et chimiques identiques, une configuration du pilote pourrait ne pas être

en mesure, peu importe le nombre de traitements, d'atteindre le niveau de saturation initiale de l'eau d'essai alors que d'autres configurations pourraient s'en approcher, l'atteindre; voire même le dépasser. Le phénomène ne relève pas de la précision des valeurs obtenues, car elle est suffisante pour distinguer les moyennes les plus éloignées. Il ne relève pas davantage du fait que la désoxygénation initiale n'était pas exactement la même (voir la section validation des résultats). Il faut considérer également l'ajout de sulfites, qui modifie la composition ionique de l'eau pouvant affecter la capacité à saturer. L'eau d'essai n'étant chimiquement plus tout à fait la même après la désoxygénation, cela peut translater le taux de saturation par rapport à celui initial de référence. S'il est préféré, l'état d'équilibre n'est plus le même pour les mêmes conditions de température et de pressions en raison des modifications chimiques de l'eau d'essai. Il devient alors logique que la masse d'oxygène recouvrée ne soit pas nécessairement égale à celle retirée; affectant ainsi les taux de recouvrement globaux calculés. Cependant, cela n'affecte pas la comparaison des comportements de dissolution d'une expérience à l'autre. À titre d'information, les trois répétitions réalisées pour l'expérience #10 en mode buse, accessibles seulement dans la base de données, ont initié une exploration préliminaire sur cet effet des sulfites. À chaque répétition successive, la quantité de sulfites a été augmentée légèrement. En comparant à chaque fois au traitement précédent, il y a une correspondance entre l'augmentation de la masse ajoutée de sulfites et la diminution des taux de recouvrement de chaque passage successifs correspondants. Cependant les différences observées sont de l'ordre de 1%; similaire à l'incertitude mesurées sur les valeurs. Il est ainsi raisonnable de négliger l'effet en première approximation. Une analyse plus poussée des données permettrait d'approfondir cette question.

Il s'avère donc nécessaire d'introduire la capacité à saturer comme une propriété à part entière. Il faut saisir que les fractions cumulées finales liées au dernier traitement affiché sur la figure 4.9 correspondent au moment où tout traitement supplémentaire abaissera la valeur de ces taux ou encore, que les taux d'oxygénation mesurés dans l'eau d'essai en mg/L recommenceront à décroître : bref, c'est le retour à un état d'équilibre. Toutes les autres fractions mesurées sont des étapes de transition dynamique. Autre précision concernant la capacité à saturer, cette dernière est considérée intrinsèque à une configuration du pilote. Il

est d'abord possible de la caractériser en regardant la fraction recouvrée cumulée finale lorsque la saturation est de nouveau atteinte. Cette mesure contient toute l'information sur la capacité à saturer, mais sa grandeur ou sa valeur ne peut être comparée à celle d'autres configurations que dans le cas précis où il est supposé que le taux d'oxygène retirée initialement est le même. Ce n'est pas le cas absolu où 100% de l'oxygène est considéré comme retiré de l'eau d'essai avant d'amorcer le traitement d'oxygénation. D'où la présence de la courbe de la capacité à saturer absolue sur la figure. Cette dernière permet de ramener la capacité à saturer à une valeur unique en comparant le taux d'oxygénation final à saturation par rapport à celui initial avant la désoxygénation. Elle ne dépend plus de la désoxygénation initiale et est comparable en tout temps d'une expérience à l'autre. Noter que par son allure, la courbe supporte l'idée que le niveau de désoxygénation initial atteint dans chacune des expériences est suffisamment semblable pour permettre la comparaison des niveaux de saturation à travers les fractions recouvrées finales de la masse retirée en oxygène. La section validation des résultats rassurera également à ce chapitre. Une différence subtile, mais nécessaire, apparaît alors dans l'interprétation. Par exemple, il devient cohérent d'affirmer, en regard de la courbe de la capacité à saturer absolue, que peu importe le niveau d'oxygénation de l'eau avant le traitement, la capacité de l'expérience #7 à saturer est de $97 \pm 2 \%$. Cependant, dans le cas où la fraction finale cumulée de l'oxygène recouvré est analysée, il faut plutôt conclure que l'expérience #7 permet de retrouver $97 \pm 2 \%$ du $8,0 \pm 0,6$ mg/L d'oxygène retirée de l'eau d'essai. Puisque le niveau de désoxygénation initiale pour les autres expériences est supposé le même, elle présente donc la meilleure capacité à saturer. Dans les deux cas, la conclusion est que l'expérience #7 a la meilleure capacité à saturer parmi toutes les expériences.

La figure 4.9 offre également plusieurs angles d'interprétation. Il donne un aperçu intéressant quant à l'évolution de l'oxygénation en termes de nombre de traitements nécessaires pour atteindre de nouveau la saturation. Par exemple, il est possible de dire qu'un seul traitement de l'expérience #7 ou de l'expérience #12 oxygène l'eau autant que deux traitements de l'expérience #6 ou #8. De même, les courbes du graphique en lien avec le nombre de traitements donne à penser qu'il existe un ratio G/L tel qu'il suffira d'un seul traitement pour

dissoudre un maximum de l'oxygène retiré initialement et d'atteindre la saturation. Cependant, il faut rapidement saisir la limite de cette déduction en raison des changements dans le régime d'écoulement si la phase gazeuse devient trop importante par rapport à la phase liquide et de l'inefficacité quant à l'utilisation de l'agent traitant qui sera rediscuté dans le cadre de la figure 4.11. L'expérience #1 appelée le bruit de fond permet de fixer de manière générale la performance de base. Il fixe le standard minimum à atteindre comme recouvrement en oxygène à chaque traitement successif autant que pour le nombre de traitements nécessaires. Il définit la performance de base en termes de capacité à saturer autant que de capacité à dissoudre. Il faut nécessairement faire mieux que cette expérience alors que l'apport en oxygène est nul, autre que celui dû aux fuites ou à l'air résiduel présent dans les tuyaux du circuit d'air. Pourtant, le fait de ne pas ajouter d'air ne maintient pas l'eau d'essai dans un état désoxygénée. Le pilote étant un système ouvert, l'eau est exposée à l'échange atmosphérique, particulièrement à son retour dans le réservoir. Plusieurs observations sont à noter. Le bruit de fond est plus performant globalement en termes de capacité à dissoudre et de capacité à saturer que les expériences #2, #3 et #4 où l'ajout d'air s'amorce progressivement. Sa capacité à saturer est supérieure aux expériences #5, #13 et #14, alors que sa capacité à dissoudre est inférieure. Ceci témoigne également qu'il n'est pas simple de qualifier le lien entre la capacité à saturer et la capacité à dissoudre. Manifestement, il y a des cas où bonne capacité à saturer ne rime pas avec une bonne capacité à dissoudre et l'inverse aussi. La dépression observée au début du graphique et qualifiée de « point de virage » dans l'analyse de la figure 4.8 mérite de nouveau l'attention en lien avec l'augmentation du ratio G/L dans les sept premières expériences du mode jet libre. La comparaison avec le bruit de fond permet d'observer qu'une hausse du ratio G/L entraîne d'abord une légère baisse dans la capacité à dissoudre accompagnée par une baisse de la capacité à saturer. Un minimum semble vouloir se dessiner entre un ratio G/L de 0,002 et un ratio G/L de 0,02. Ensuite, à partir de l'expérience #5, la capacité à dissoudre redevient supérieure et la capacité à saturer similaire. La poursuite de l'augmentation du ratio G/L pour l'expérience #6 et #7 coïncide alors avec une augmentation de la capacité à dissoudre et de la capacité à saturer. En poussant l'analyse, il est remarqué que la capacité à dissoudre pour le premier traitement se comporte comme attendu. Les taux de dissolution croissent

progressivement d'une expérience à l'autre conséquemment à l'augmentation du ratio G/L. Cependant, la figure 4.9 montre qu'au fur et à mesure que l'on progresse vers la saturation à travers les autres traitements successifs, il y a une inversion qui se met en place pour les expériences #2, #3 et #4. Après le deuxième traitement, le bruit de fond a une progression vers le niveau de saturation égal ou supérieur à l'expérience #2, #3 et #4 et cette tendance se maintient pour les passages suivants jusqu'à la saturation. Une autre observation en regard de la capacité à saturer est l'influence peut marquée de la variation du ratio G/L. Il semble y avoir une tendance à la hausse à partir de valeur de ratio G/L supérieures à 0,008 mais la pente de cette variation semble très faible avec des exceptions. Par exemple, dans le mode avec mélangeurs statiques, l'expérience #12 a un ratio G/L plus élevé, une capacité à dissoudre supérieure par rapport à l'expérience #11, mais elle a une capacité à saturer absolue équivalente en regard de la précision sur les moyennes. Il y a même une inversion dans le cas du mode buse (expériences #9 et #10), où la capacité à dissoudre augmente avec le ratio G/L mais pas la capacité à saturer. Bref, le fait d'ajouter beaucoup d'agent traitant semble augmenter la capacité à saturer, mais l'avantage n'est pas très marqué en regard des précisions obtenues sur les valeurs.

La figure 4.9 permet aussi de comparer les différents modes du pilote suivant leur capacité à saturer. Encore une fois, la base comparative repose sur les expériences ayant un même ratio G/L de 0,08. En se fiant aux précisions obtenues sur les moyennes des différentes fractions calculées de la capacité à saturer absolue, la capacité à saturer semble très semblable d'un mode à l'autre, à l'exception faite du mode avec anneaux de Rachig (#13) et du mode LTCP (#14).

Tableau 4.4 Ordre qualitatif de performance des différents modes du pilote pour un ratio G/L de 0,08 par rapport à leur capacité à saturer

| Mode (Expérience) | Ordre 1-plus performant |
|--|------------------------------------|
| Mélangeurs statiques (#11) | 1 |
| Buse (#10) | 1 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 2 |
| Jet libre (#6) | 3 |
| LTCP (#14) | 4 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 5 |

Ceci amène à la figure 4.10, qui est un outil de comparaison de performance supplémentaire cherchant, entre autres, à quantifier et caractériser l'effet de l'ajout de gaz par rapport à l'expérience #1 du bruit de fond. La propriété mise de l'avant dans cette figure est la capacité à dissoudre. La figure 4.10 est construite à partir des résultats de la figure 4.9 mais en éliminant le travail équivalent réalisé par le bruit de fond pour un même nombre de traitement donné. Il s'agit de soustraire le taux de recouvrement cumulé à chaque passage à celui des autres expériences. Les résultats doivent être interprétés de la façon suivante.

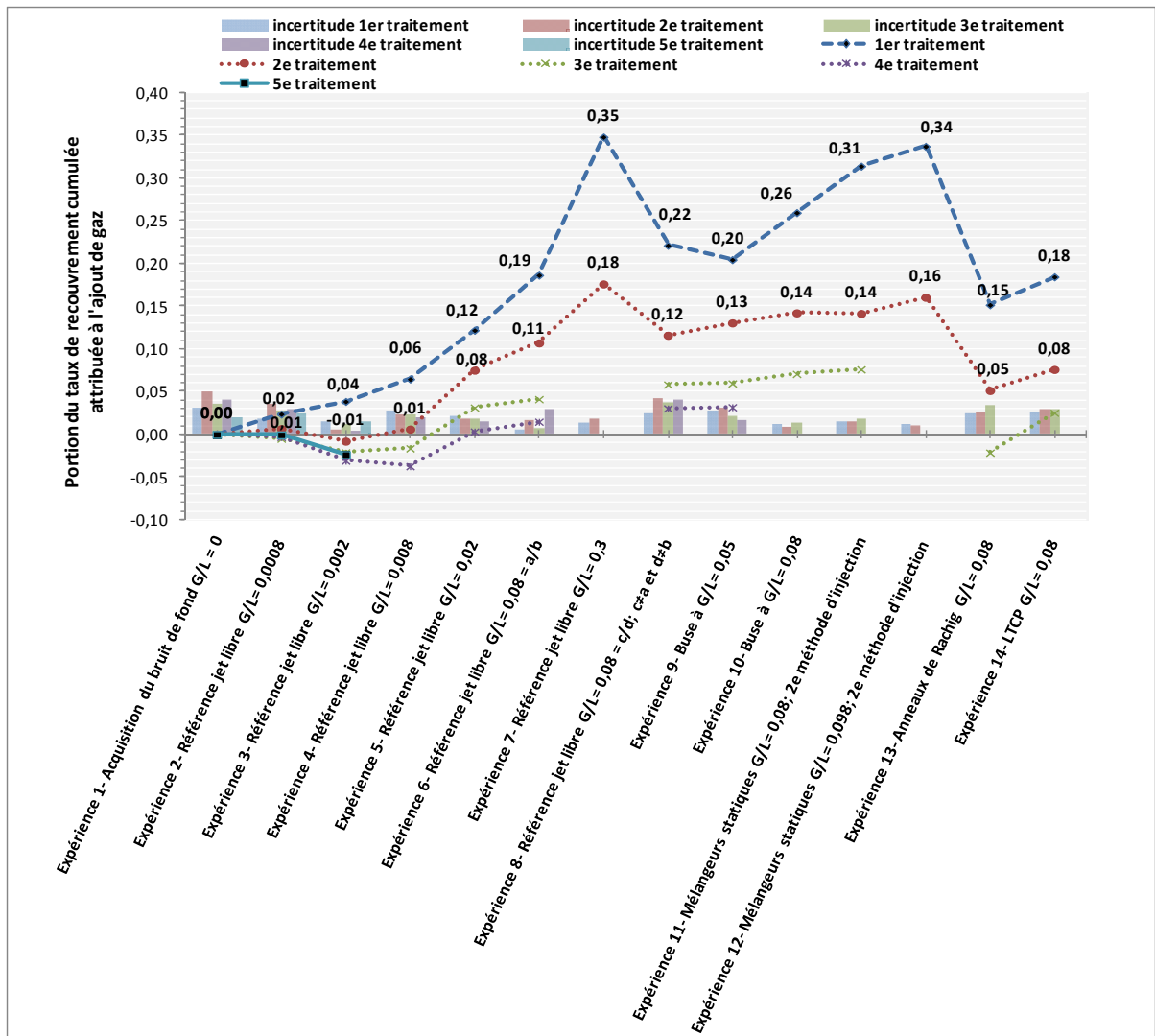


Figure 4.10 Travail supplémentaire accompli par rapport au bruit de fond après chaque traitement successif

Tout d'abord, grâce à l'ajout de gaz, l'expérience #7 permet après un premier traitement de recouvrir $0,35 \pm 0,01$ fois plus de la masse d'oxygène initialement retirée que le bruit de fond. Pour l'expérience #12, c'est $0,34 \pm 0,01$ fois plus. Après deux traitements, alors que la saturation est atteinte; cette avantage diminue et n'est plus que de $0,16 \pm 0,01$ fois pour l'expérience #12 et de $0,18 \pm 0,02$ fois la masse d'oxygène enlevée de l'eau d'essai pour l'expérience #7. Cette observation se généralise à chaque traitement successif pour les autres expériences. Encore un fois, il témoigne du fait que la performance en termes de capacité de

dissolution diminue à mesure que l'on s'approche de la saturation. Il y a également un nivellement entre les expériences à mesure que des traitements supplémentaires sont nécessaires. Bref, elles se distinguent moins l'une de l'autre par rapport au bruit de fond. À titre d'exemple, l'expérience #13 du mode avec anneaux de Rachig indique qu'après trois traitements, le rendement est devenu inférieur à celui du bruit de fond. Autrement dit, l'avantage observé pour les deux premières étapes de traitement conduisant à la saturation n'est plus. Ainsi, pour les trois premiers traitements, ne rien ajouter en gaz aura le même effet de dissolution en oxygène, en fait légèrement supérieur, que le mode avec anneaux de Rachig. Encore une fois, il serait intéressant d'expliquer pourquoi en plus de devenir moins performante après trois traitements, le niveau de saturation est déjà atteint, donnant à cette expérience une capacité à saturer moins importante. Évidemment, la distinction entre les deux expériences, c'est la présence des anneaux et l'ajout de gaz. Donc l'explication passe par cette modification. Toutefois, ce qui peut représenter un désavantage en apparence est possiblement un atout de traitement non négligeable suivant une hypothèse d'adsorption d'oxygène par les anneaux. Cette piste devrait être évaluée et est reprise dans la discussion synthèse.

La figure 4.10 permet d'observer rapidement l'avantage des différents modes l'un par rapport à l'autre en terme de capacité à dissoudre et de confirmer l'ordre qualitatif établi au tableau 4.3. Le tableau 4.5. le résume de manière quantitative..

Tableau 4.5 Gain en performance de chaque mode par rapport au bruit de fond pour un premier traitement de réoxygénation à $G/L = 0,08$

| Mode (Expérience) | % plus performant que le bruit de fond |
|--|---|
| Mélangeurs statiques (#11) | 31 ± 2 |
| Buse (#10) | 26 ± 1 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 22 ± 2 |
| Jet libre (#6) | $19,0 \pm 0,5$ |
| LTCP (#14) | 18 ± 3 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 15 ± 2 |

La figure permet aussi de constater que l'ajout de gaz ne favorise pas dans les premières expériences le retour à la saturation en comparaison du bruit de fond. Dans ce dernier cas, cela suggère soit une erreur expérimentale importante, ce qui est écarté pour le moment, soit une variable qui influence la dissolution et qui n'est pas associée à l'ajout de gaz. En fait, elle entrerait initialement en compétition avec l'augmentation du ratio G/L. Cependant, l'allure générale en mode jet libre suggère malgré tout que l'augmentation du ratio G/L favorise la capacité à dissoudre. Mise en garde, à part pour le premier traitement, la multiplication des différents ratios par le taux moyen d'oxygène retiré initialement de l'eau d'essai ne donne pas la masse exacte d'oxygène dissous attribuable à l'ajout de gaz à chaque traitement. Cette interprétation serait erronée. Il faut plutôt la voir comme la masse d'oxygène dissous que le bruit de fond n'aurait pas fourni après le même nombre de traitements donnés. Cette dernière approche est subtile, mais permet la comparaison entre les expériences en référant à l'effet équivalent produit par le bruit de fond. S'il est souhaité d'éliminer la performance intrinsèque associée au bruit de fond à chaque passage, comme dans le cas du premier traitement, il est nécessaire de connaître le nouveau point de départ en termes de désoxygénation de l'eau d'essai pour le traitement visé. Le raisonnement est présenté à l'ANNEXE X.

Maintenant, la figure 4.11 a pour objectif de caractériser l'efficacité de transfert de la masse en oxygène ajoutée pour chaque expérience. Cette dernière variable doit être évaluée afin de connaître l'efficacité d'utilisation de l'agent traitant lors d'un traitement, et ce en relation avec les performances en terme de capacité à dissoudre et de capacité à saturer. Dans le cadre de la figure, les points ronds identifiés sur la courbe pointillée associée sont une transformation de la courbe des ratios G/L. Elle établit pour chaque expérience la masse d'oxygène ajoutée par litre d'eau traitée. Attention, ce n'est pas la concentration dans l'air comprimé ajouté, distinction importante ici. L'exactitude est initialement moins importante que l'application du même calcul pour toutes les expériences afin de comparer les comportements. La formule utilisée consiste à multiplier le ratio G/L par la fraction d'oxygène dans l'air, par la masse molaire de l'oxygène, par la pression fixée initialement pour l'air comprimé à l'entrée du pilote; tout en divisant par la température du gaz et la constante des gaz parfaits. Voici les valeurs utilisées : une pression interne de l'air comprimé

initialement fixée à $1,00 \pm 0,05$ bar, une constante des gaz parfaits suivant les bonnes unités à $0,0831447 \pm 0,0000001$ L*bar/mol*K, la masse molaire de l'oxygène à $15999,4 \pm 0,3$ mg/mol, une fraction d'oxygène dans l'air au niveau de la mer estimée à $0,2095 \pm 0,0001$ et les données expérimentales associées à la température du gaz et du ratio G/L mesuré à chaque essai. Les valeurs affichées constituent la moyenne calculée en prenant tous les traitements de réoxygénation réalisés dans chaque expérience.

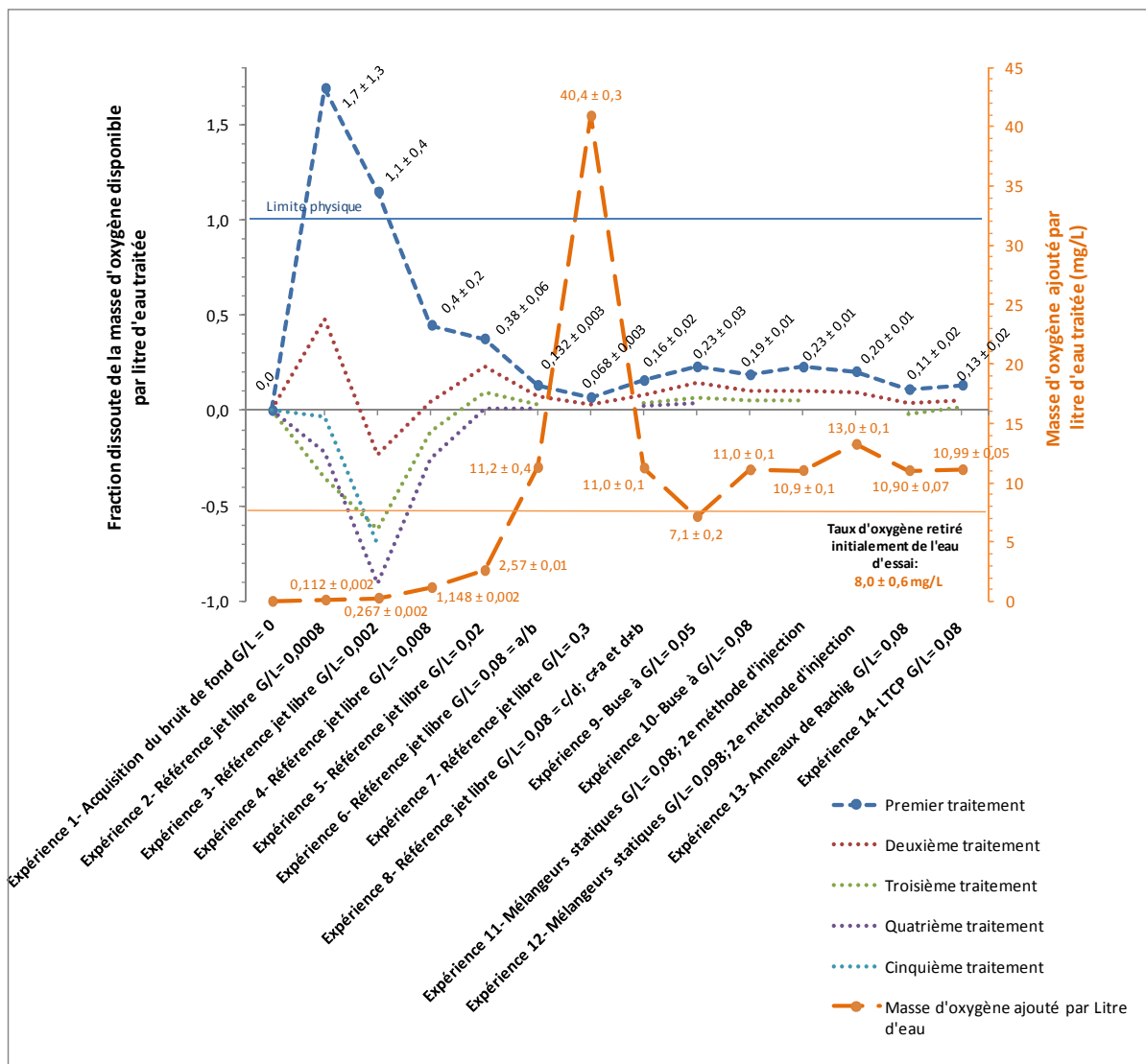


Figure 4.11 Évolution de l'efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajoutée en éliminant l'apport du bruit de fond à traitement équivalent

À titre d'exemple, l'expérience #7 avec le ratio G/L de 0,3 le plus élevé se démarque avec une masse ajoutée la plus élevée par litre d'eau traitée de $40,4 \pm 0,3$ mg/L. Pour les ratios G/L situés autour de 0,08, c'est un taux moyen d'environ 11,0 mg/L alors que par exemple, pour l'expérience #6, c'est précisément $11,2 \pm 0,4$ mg/L. Il est intéressant de mettre en relation la masse d'oxygène ajoutée par rapport à la masse d'oxygène qui peut être dissoute lors d'un traitement. Cela explique la présence de la ligne horizontale en trait plein au bas de la figure, référant au niveau de désoxygénation initiale de $8,0 \pm 0,6$ mg/L. Attention cependant, la comparaison à savoir si la quantité d'oxygène ajoutée par litre d'eau est supérieure ou non à cette masse d'oxygène retirée est valable dans le cas du premier traitement. Pour les traitements subséquents, il faut connaître la masse en oxygène restante pouvant être dissoute dans l'eau. De manière générale, puisque la masse d'oxygène ajoutée ne change pas à chaque traitement, mais que la quantité d'oxygène pouvant être dissoute diminue, nécessairement la différence de l'une par rapport à l'autre devient plus importante à chaque traitement successif. Dans le cas de l'expérience #9, pour un ratio G/L de 0,05, la quantité moyenne d'oxygène ajoutée à chaque traitement est de $7,1 \pm 0,2$ mg/L; ce qui est inférieure à l'espace disponible de $8,0 \pm 0,6$ mg/L lors du premier traitement. Cependant, à partir du deuxième traitement, la masse d'oxygène ajoutée est largement supérieure cette fois alors qu'il ne reste plus que $[(8,0 \pm 0,6) - ((0,82 \pm 0,01) * (8,0 \pm 0,6))] = 1,44 \pm 0,05$ mg/L en moyenne d'oxygène pouvant être dissous lors du deuxième traitement. Le $0,82 \pm 0,01$ étant la fraction recouverte au premier traitement (voir les figures 4.7 ou 4.8).

Ceci étant précisé, l'objectif du graphique est simple : quelle fraction de la masse d'oxygène ajoutée par le gaz sert la dissolution? Et comment évolue-t-elle à travers les étapes de traitement successives? Ceci caractérise le concept d'efficacité de transfert mais une distinction s'impose afin de mieux saisir certains aspects du graphique. Encore une fois, l'effet comparatif du bruit de fond comme traitement global est éliminé pour construire les courbes. En d'autres termes, les valeurs utilisées dans la construction des moyennes présentées dans le graphique 4.10 sont utilisées dans la construction du graphique 4.11. Voilà pourquoi il devient utile d'introduire une notion d'efficacité de transfert « comparative » versus « directe ». La raison provient encore une fois de la méthode de calcul de la masse en

oxygène dissoute que l'on attribue au bruit de fond et de celle attribuée à l'ajout de gaz. Lors du premier traitement, le point de départ de la désoxygénation est considéré le même. Ainsi, la performance de dissolution du bruit de fond d'ajouter $0,56 \pm 0,03$ fois la masse d'oxygène retirée initialement de $8,0 \pm 0,6$ mg/L est supposée s'additionner à la performance de toutes les autres expériences. Lorsque cette masse associée est déduite de celle globalement recouvrée par chacune des expériences, ce qui reste est considéré provenir directement de l'oxygène du gaz ajouté. C'est donc ce qui est appelé l'efficacité de transfert « directe ». D'un autre côté, pour les traitements successifs, le point de départ de la désoxygénation n'étant plus le même, la fraction du bruit de fond cumulée à cette étape de traitement successive ne mesure plus tout à fait la masse d'oxygène directement attribuable au bruit de fond pour le traitement successif visé. Pour la retrouver, il faut revenir au raisonnement présenté à la fin de l'analyse de la figure 4.7 et à la méthode de calcul présentée à l'ANNEXE X. Cependant, afin de faciliter la comparaison de la performance en efficacité de transfert d'une expérience à l'autre et d'en suivre correctement l'évolution par rapport aux étapes de traitement, la perspective est de considérer la masse d'oxygène dissoute que le bruit de fond n'aurait pas pu fournir après le même nombre de traitement et non par rapport à la masse réellement attribuable au bruit de fond après chaque traitement donné. C'est ainsi que les ratios de la figure 4.10 sont utilisés et multipliés par la masse d'oxygène retirée initialement pour donner la masse d'oxygène que le bruit de fond n'arrive pas à dissoudre après le même nombre de traitement donné. Cette masse d'oxygène par litre d'eau traitée provient tout de même de celle présente dans le gaz ajouté. En divisant la première par la dernière, cela définit l'efficacité de transfert « comparative », car elle réfère au travail de dissolution que ne fait pas le bruit de fond à chaque étape de traitement. Comme toutes les expériences sont ramenées à ce point de référence, il est possible de comparer leur performance. Cependant, dans le cas précis du premier traitement, les deux définitions coïncident. De manière générale, si l'efficacité de transfert « comparative » demeure positive, elle surestimera l'efficacité de transfert « directe » pour un traitement donné d'une expérience. Mais les comportements associés sont les mêmes et caractérisent l'efficacité de transfert de façon générale. La distinction est réalisée pour éclaircir le contexte précis des valeurs obtenues et cette dernière repose sur l'utilisation du bruit de fond comme une

expérience globale de traitement à laquelle les autres expériences sont comparées versus sa présence intrinsèque dans la performance de chacune des unités de traitement des autres expériences.

Une première observation à retenir de la figure 4.11 concerne la diminution de l'efficacité de transfert à chaque traitement successif. Ceci est conséquent avec le fait que la masse totale d'oxygène dissous à chaque traitement diminue. Similairement à la capacité de dissolution, plus il y a d'oxygène dissous dans l'eau d'essai, plus l'efficacité de transfert diminue. Cependant, un aspect intéressant est d'examiner la différence d'efficacité d'un traitement à l'autre pour une même expérience. Un objectif fondamental de performance est de minimiser cette différence. Or à ce chapitre, l'expérience #6, #7 et #8 semblent faire meilleure figure. Un autre aspect à mentionner concerne la performance négative observée pour l'expérience #2, #3 et #4 pour les traitements succédant au premier. Les valeurs négatives sont conservées et affichées pour une raison. Encore une fois, une espèce de « point de virage » semble exister pour l'efficacité de transfert conséquemment à l'analyse réalisée dans le cadre des autres figures. Il n'est pas exclu d'interpréter ces dernières comme une réelle perte en oxygène. C'est-à-dire que non seulement tout l'oxygène du gaz ajouté n'est pas dissout, mais en plus, il y a une perte supplémentaire prise sur l'oxygène fourni normalement par le bruit de fond. Ainsi, la fraction négative multipliée par la masse d'oxygène ajoutée donne un aperçu de cette perte en oxygène bien que non exacte. Une deuxième observation intéressante concerne la limite physique associée à l'efficacité de transfert (trait horizontal dans le haut du graphique). Elle signifie qu'il n'est pas possible de dissoudre plus que 100% de la masse totale de l'oxygène ajouté par litre d'eau traitée. Pourtant lors du premier traitement l'expérience #2 et #3 obtiennent des ratios respectifs de $1,7 \pm 1,3$ et $1,1 \pm 0,4$ pour des masses d'oxygène ajoutée très faibles mais précises de $0,112 \pm 0,002$ mg/L et de $0,267 \pm 0,002$ mg/L. L'interprétation cohérente est d'affirmer qu'il y a un problème de précision et d'exactitude dans les données due à une erreur expérimentale plus importante mais qui diminue avec l'augmentation de la quantité de gaz ajouté. Une autre observation en apparence contraire à ce qui pourrait être présumé est que même si moins d'oxygène est fourni par litre d'eau traité par rapport à la quantité pouvant être dissoute, cela ne garantit en

rien que tout l'oxygène présent dans le gaz ajouté sera nécessairement dissous. En effet, l'expérience #4 et #5 fournissent respectivement $1,148 \pm 0,002$ mg/L et $2,57 \pm 0,01$ mg/L d'oxygène par litre d'eau traité, ce qui est nettement inférieure au $8,0 \pm 0,6$ mg/L d'oxygène libérée lors de la désoxygénation initiale. Elles ne maintiennent pourtant pas un taux de transfert de 100%; elles présentent plutôt des taux de transfert de $0,4 \pm 0,2$ et de $0,38 \pm 0,06$ fois la masse d'oxygène ajoutée.

L'efficacité de transfert diminue rapidement avec l'augmentation du ratio G/L ou encore avec l'augmentation de la quantité d'agent traitant utilisé ou encore avec l'augmentation de la proportion de la phase gazeuse sur la phase liquide. Cette observation semble se généraliser autant dans le mode jet libre que dans le mode buse et dans le mode avec mélangeurs statiques. Au premier traitement, l'expérience #6 avec un ratio G/L de 0,08 ne présente plus qu'un pourcentage de transfert en oxygène de $13,2 \pm 0,3$ %. De plus la masse en oxygène ajouté par litre d'eau traitée de $11,2 \pm 0,4$ mg/L dépasse cette fois la valeur de $8,0 \pm 0,6$ mg/L du taux moyen d'oxygène retiré initialement. Ensuite, à l'expérience #7, multipliant presque par quatre fois la masse d'oxygène ajouté, le transfert en pourcentage est deux fois moins grand par rapport à l'expérience #6. Dans ce cas, $0,068 \pm 0,003$ fois la masse de $40,4 \pm 0,3$ mg/L d'oxygène est dissout dans l'eau d'essai; ce qui fait de cette expérience la plus inefficace par rapport à l'utilisation de l'agent traitant. Autrement, un ordre clair de performance en efficacité de transfert « directe » peut être établi suivant les expériences présentant un ratio G/L similaire de 0,08. Le voici au tableau 4.6.

Tableau 4.6 Performance en efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajouté par litre d'eau pour un premier traitement pour un ratio G/L de 0,08

| Mode (Expérience) | % d'efficacité de transfert |
|--|------------------------------------|
| Mélangeurs statiques (#11) | 23 ± 1 |
| Buse (#10) | 19 ± 1 |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau (#8) | 16 ± 2 |
| Jet libre (#6) | $13,2 \pm 0,3$ |
| LTCP (#14) | 13 ± 2 |
| Anneaux de Rachig (#13) | 11 ± 2 |

Ce classement peut être généralisé. En examinant l'efficacité de transfert «comparative» pour les traitements successifs, une inversion est seulement observée lors du deuxième traitement entre le mode buse et le mode avec mélangeur mais la différence n'est pas significative. Le même classement est ainsi conservé. Noter que la précision obtenue sur les moyennes présentées est suffisamment bonne pour les distinguer.

Maintenant, si l'on regarde la question suivante : pour quel ratio G/L l'efficacité de transfert en combinaison avec les autres variables d'intérêt telle la capacité à dissoudre et la capacité à saturer serait-elle optimale? L'expérience #9 du mode buse avec un ratio G/L de 0,05 semble établir une piste à ce sujet. Comme prévu l'efficacité de transfert est plus grande que dans l'expérience #10 avec un pourcentage cette fois de $23 \pm 3 \%$ au premier traitement pour une masse de $7,1 \pm 0,2$ mg/L d'oxygène ajouté par litre d'eau traitée. Lors de ce traitement, la masse ajoutée se rapproche davantage de la masse pouvant être dissoute de $8,0 \pm 0,6$ mg/L qui provient de la désoxygénation initiale. Comme la figure 4.11 témoigne aussi du nombre de traitement, il est possible d'envisager qu'en augmentant légèrement le ratio G/L pour atteindre le 8,0 mg/L, le nombre de traitements nécessaires tomberait à trois au lieu de quatre tout comme dans l'expérience #10, favorisant la capacité à dissoudre tout autant que la capacité à saturer mais en abaissant légèrement l'efficacité de transfert. Ce serait alors la meilleure combinaison envisageable. La question est de savoir si cela se généralise, c'est-à-dire s'il est toujours plus avantageux de travailler à un ratio G/L coordonné sur la quantité d'oxygène pouvant être dissoute?

Ce dernier exemple accentue l'idée qu'une approche multicritères est nécessaire pour établir la performance optimale recherchée. Il a été observé que l'expérience #7 en mode jet libre possédait la meilleure capacité à dissoudre, la meilleure capacité à saturer tout en présentant la pire efficacité de transfert. Bref, elle permet d'atteindre rapidement la saturation avec un bon taux de recouvrement en oxygène mais elle gaspille beaucoup l'agent traitant utilisé. De ce fait, constitue-t-elle la meilleure configuration du pilote à adopter? Cela peut dépendre de la situation et des besoins. Ce dernier raisonnement explique la présence du tableau 4.7

établissant un ordre qualitatif de performance pour différents critères qui sont ressortis de l'analyse des précédents résultats.

Tableau 4.7 Synthèse des performances qualitatives des différents modes l'un par rapport à l'autre pour un ratio G/L de 0,08 suivant de multiples critères

| | CRITÈRES | Capacité à dissoudre | Capacité à saturer | Temps d'un essai | Nombre d'essais pour saturer | Temps cumulé de l'expérience | Efficacité de transfert | SOMME |
|--|----------------------------|----------------------|--------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------|
| MODES DU PILOTE | RANG DE PERFORMANCE | | | | | | | |
| Mélangeurs statiques | 1 | 1 | 3 | 1 | 4 | 1 | 13 | |
| Buse | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 13 | |
| Jet libre avec restriction sur le débit d'eau | 3 | 2 | 4 | 2 | 6 | 3 | 20 | |
| Jet libre | 6 | 3 | 1 | 2 | 5 | 4 | 21 | |
| LTCP | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 5 | 16 | |
| Anneaux de Rachig | 5 | 5 | 1 | 1 | 2 | 6 | 20 | |

L'objectif de ce tableau est de faire ressortir la performance des différentes expériences non plus seulement par rapport à une seule variable, mais en combinaison. De plus, utilisant simplement un rang de performance des modes l'un par rapport à l'autre, ceci témoigne des choix possibles et des difficultés pouvant survenir. En effet, la même pondération a été accordée à chacun des critères. Ceci fait en sorte que la somme finale des différents rangs obtenus pour chacun des modes donne un ordre de performance globale donné questionnable, alors que le mode LTCP, avec une somme globale inférieure, semble plus intéressant que le mode jet libre avec restriction sur le débit d'eau. Or si on se fie seulement aux trois critères d'efficacité de transfert, de capacité à dissoudre et de capacité à saturer, ce n'est plus le cas. Il est donc important d'établir les critères de performance qui ont le plus d'intérêt dans une situation donnée. En effet, il n'est pas difficile d'imaginer que dans certains cas, le temps de traitement pourrait, par exemple, être plus important que l'efficacité de transfert. En résumé, la notion de performance est complexe et multi-variée.

4.3 Validation des résultats

Cette section a pour but d'analyser la qualité des expérimentations et des données recueillies en insistant sur la variable principale qu'est le taux d'oxygène mesuré dans l'eau. Cela permettra de mentionner au passage quelques facteurs affectant principalement la distribution des écarts-types observés. Les figures 4.12 et 4.15 servent donc à l'évaluation de la variance et de l'erreur relative des fractions recouvrées (figure 4.7) et des fractions recouvrées cumulées (figure 4.9) par traitement et par expérience. Ensuite, les figures 4.13 et 4.14 servent à vérifier l'influence sur la précision des résultats des différences observées dans la désoxygénation de l'eau d'essai. Cela afin de valider le fait de considérer le point de départ du traitement de réoxygénation de chacune des expériences comme étant le même et encadrant ainsi le contexte d'analyse des résultats. À titre d'exemple, comparer la performance de chaque expérience l'une par rapport à l'autre en utilisant la fraction cumulée de l'oxygène recouvré à chaque étape de traitement.

En premier lieu, il faut éliminer les variables moins sensibles que sont la température du laboratoire, la température du gaz et la pression atmosphérique de chacune des expériences. Ces dernières n'expliquent pas significativement la différence dans les taux d'oxygène mesurés et sont très stables tout au long des expériences. Parmi les autres facteurs moins bien contrôlés par l'expérimentateur, mais pas nécessairement non contrôlable dans le futur, il y a l'eau d'essai utilisé. En effet, l'eau utilisée est l'eau potable de la ville de Montréal. Cette dernière, bien que très stable dans sa composition chimique présente des variations significatives du taux d'oxygénation initiale à chaque nouvelle répétition d'expérience; et pas seulement en raison des différences dans la température de l'eau au départ d'une expérience. En effet, la période de l'année a une influence. Lorsque le froid de l'hiver prend de l'importance, l'eau d'essai présente un niveau d'oxygène naturellement plus élevé à température égale. Cependant, une partie de la variation du taux d'oxygène initial s'explique aussi par la méthode de mélange d'eau froide et d'eau chaude pour obtenir l'eau d'essai à la température initialement visée. Ces facteurs influencent la désoxygénation. Un autre facteur

d'erreur associé à la température de l'eau concerne l'augmentation observée à chaque passage dans le pilote due au transfert de chaleur de la pompe.

Maintenant, en raison de la structure d'analyse par traitement successif adoptée, le taux d'oxygène initial de l'eau d'essai est un facteur important à considérer lors de la désoxygénation. Puisque ce dernier est rarement constant, cela affecte la masse de sulfites à ajouter pour désoxygéner l'eau de façon similaire. Un choix doit être fait entre ajouter exactement la même masse de sulfites de sorte de retirer exactement la même masse d'oxygène de l'eau (taux de désoxygénation) ou bien d'ajuster cette masse à chaque fois de sorte d'obtenir exactement le même niveau d'oxygène après désoxygénation (niveau de désoxygénation). La question est de savoir comment l'un et l'autre affecte la reproductibilité des performances de réoxygénation. Dans le cadre du projet, un équilibre est maintenu entre les deux et la suite montre que cet équilibre s'est avéré raisonnable pour les besoins initiaux. Cependant la question devra être mieux maîtrisée. Elle peut se résumer de la façon suivante : comment l'espace disponible dans l'eau pour l'ajout d'oxygène et l'espace déjà occupée par l'oxygène conditionnent-ils la performance d'oxygénation? À ceci il faut ajouter l'impact de la modification chimique de l'eau. Dans ce dernier cas, l'analyse des résultats a montré que la différence dans les masses de sulfites ajoutés peut être négligée en première approximation. Ce n'est pas le facteur principal faisant varier la fraction recouverte d'une répétition à l'autre. Est-il possible d'en dire autant de l'influence de la variation du niveau de désoxygénation obtenue (espace occupé) et de celle de la variation du taux d'oxygène retiré (espace disponible) sur la variation des résultats? La suite tente de répondre à cette interrogation. La figure 4.12 montre qualitativement si la courbe de la moyenne des écart-types des fractions recouvertes cumulées subit le même genre de variation que la courbe des écart-types du taux de désoxygénation et du niveau de désoxygénation. En d'autres termes, est-ce qu'un grand écart sur la moyenne mesuré de l'un se traduit par un grand écart sur la moyenne de l'autre. Il y a une tendance en ce sens, mais ce ne semble pas être l'effet dominant.

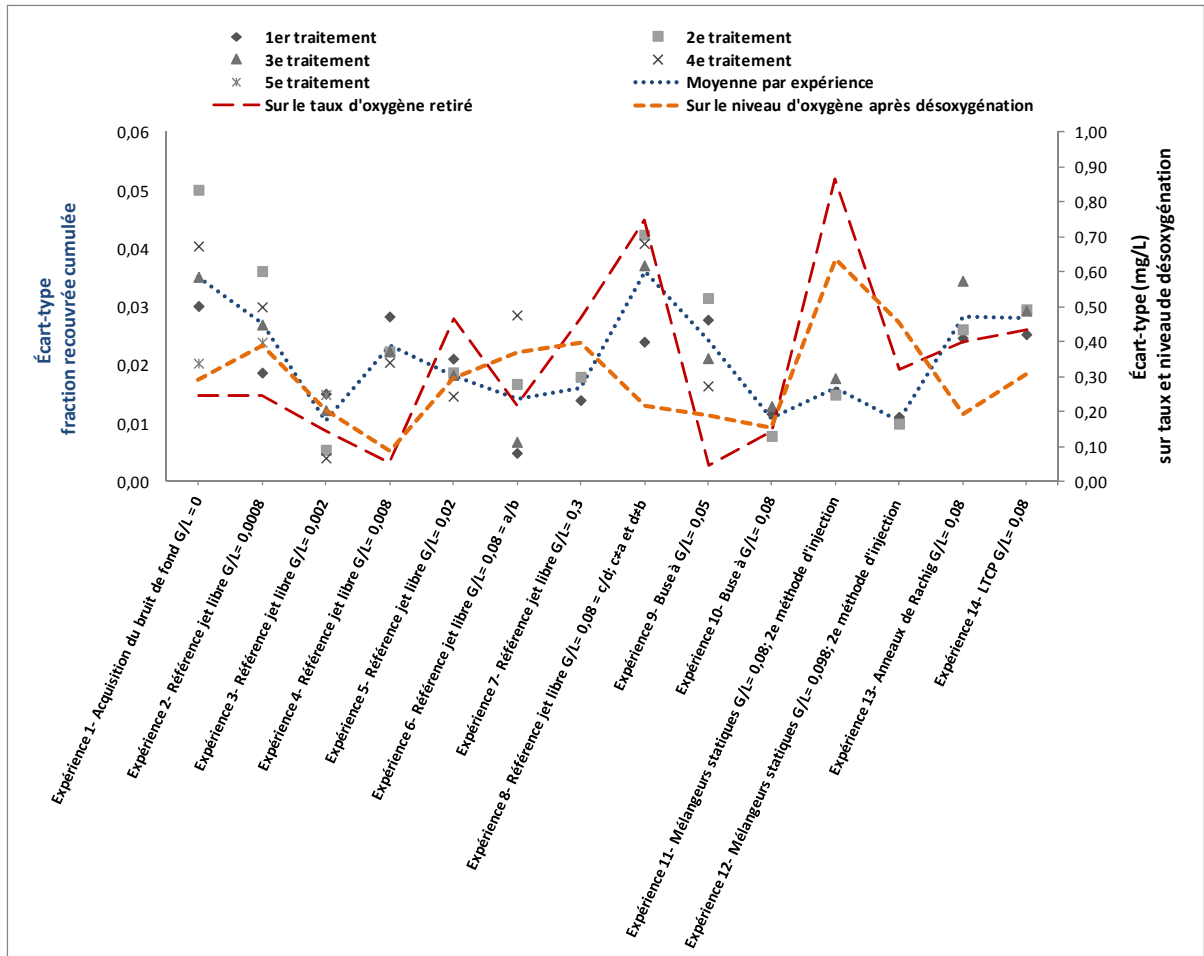


Figure 4.12 Analyse sommaire de l'erreur sur la fraction recouvrée cumulée en lien avec celle du taux de désoxygénation et du niveau de désoxygénation

À titre d'exemple, l'expérience #4 et l'expérience #10 sont les plus précises et équilibrées en termes de désoxygénation. En effet, pour ces deux expériences, l'équilibre souhaité entre la précision sur le niveau d'oxygène après désoxygénation et la précision sur la masse d'oxygène totale retirée est excellent. Il y a donc eu un bon contrôle de la masse de sulfites ajoutés en lien avec le niveau d'oxygène initial observé à chaque répétition de ces expériences. Mais attention de ne pas confondre équilibre et précision ici. L'expérience #4 présente des écart-types plus faibles dans les deux facettes de la désoxygénation que l'expérience #10. Toutefois, les deux ont des désoxygénations équilibrées, car les deux facettes présentent des écart-types faibles. Ceci peut se justifier par un bref retour sur la figure 4.3 qui montre que c'est pour l'expérience #4 que le niveau de précision sur le niveau

d'oxygène initial est le plus élevé à $9,40 \pm 0,05$ mg/L. En comparaison, l'expérience #10 a obtenu une moyenne de $10,5 \pm 0,2$ mg/L. Malgré cela, il faut remarquer qu'avec un écart-type de 0,023, l'expérience #4 ne présente pas pour autant la meilleure moyenne par expérience des écart-types des fractions recouvrées cumulées. Sur la figure, en examinant l'expérience #3 ou l'expérience #5, globalement leur désoxygénation est moins précise et équilibrée avec des écart-types associés plus élevés. Pourtant leur moyenne par expérience des écart-types de la fraction recouvrée cumulée est plus petite avec des valeurs respectives de 0,010 et 0,018, contrairement à ce qui serait attendu si la désoxygénation influençait fortement. D'un autre côté, l'expérience #10 présente quant à elle une moyenne par expérience à 0,011. Vers la gauche, l'expérience #9 a une désoxygénation précise et comparable, mais un peu moins équilibré. Cette fois, l'écart sur les fractions recouvrées s'accroît logiquement conduisant à une moyenne par expérience de 0,024. Même tendance en poursuivant vers l'expérience #8 qui montre une désoxygénation parmi les moins précises et les moins bien équilibrées et la moyenne des écart-types des fractions recouvrées à 0,036 est la plus élevée de toutes les expériences. Toutefois, en se reportant du côté de l'expérience #11, alors que la désoxygénation est la moins précise de toutes les expériences, et bien la moyenne par expérience des écarts-types n'est pas pour autant la plus élevée à 0,16 (loin de celle de l'expérience #8 mentionnée précédemment et tout près de celle de l'expérience #10). Ces observations tendent à montrer une influence de la désoxygénation sur l'erreur expérimentale, mais elle ne constitue pas le facteur principal dans le cadre des expérimentations. Les figures 4.13 et 4.14 consolident cette affirmation et justifient la comparaison des résultats suivant une hypothèse de similarité de la désoxygénation. Elles cherchent à vérifier l'existence d'une relation pour expliquer les erreurs obtenues sur les fractions recouvrées par l'erreur observée sur la désoxygénation de l'eau d'essai. Les deux variables d'intérêts que sont la masse d'oxygène retirée par litre d'eau (figure 4.13) et le taux d'oxygène de l'eau après désoxygénation (figure 4.14) sont analysés. La figure 4.13 montre qu'il n'existe pas de relation évidente pour expliquer l'erreur relative de la fraction recouvrée cumulée en fonction de l'erreur relative sur le taux d'oxygène retiré. Certes, il est possible de déceler une légère tendance à la hausse de l'erreur relative de la fraction recouvrée pour une augmentation allant de 0% à 10% de l'erreur sur le taux de désoxygénation, mais en la

comparant à la grande variabilité observée sur ce même intervalle, une autre explication que le simple fait de ne pas bien désoxygéner s'en déduit.

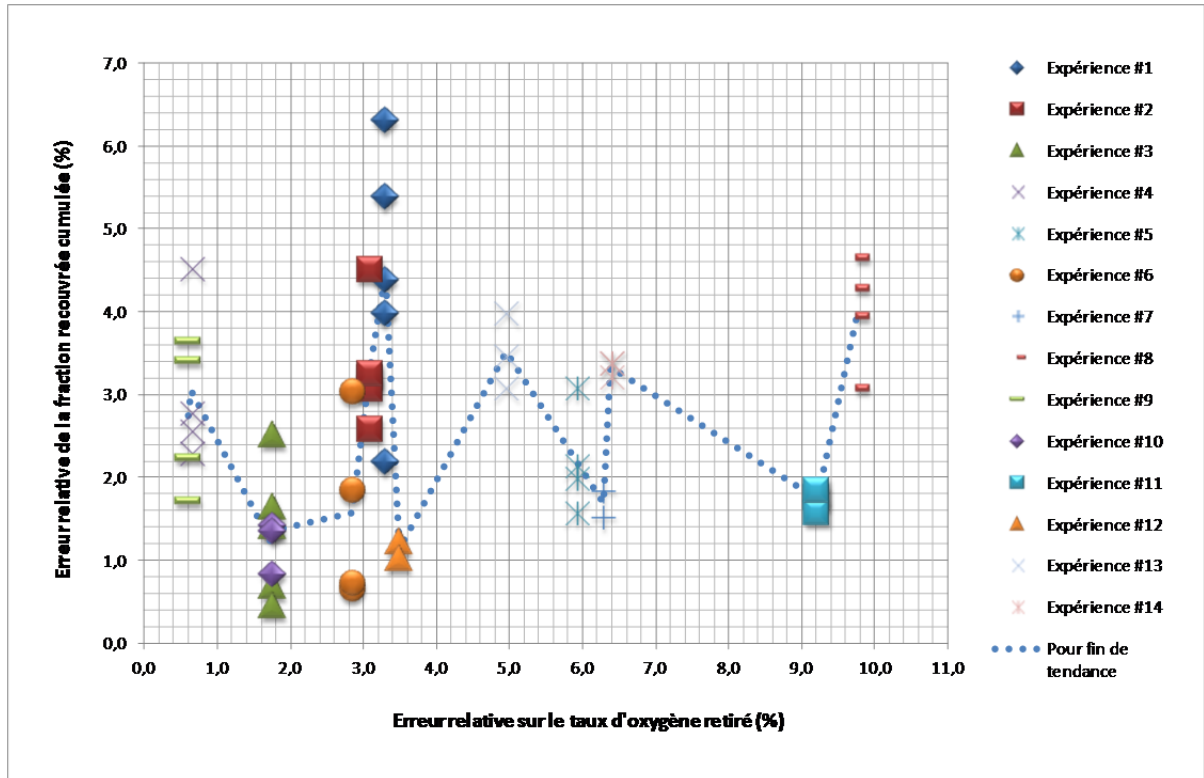


Figure 4.13 Relation entre la variance de la fraction recouvrée cumulée et celle du taux de désoxygénation

L'expérience #11 en témoigne, alors que pour un écart de 9 % sur le taux de désoxygénation, il a été possible de maintenir malgré tout une précision inférieure à 2% sur la fraction recouvrée cumulée à l'instar des expériences #3 et #10. Cependant, pour ces dernières, l'erreur sur le taux de désoxygénation tourne autour de 1,8 %. De la même façon la figure 4.15 ne permet pas de déduire de relation évidente entre l'erreur relative de la fraction recouvrée cumulée et l'erreur relative du niveau de désoxygénation. Encore une fois, plusieurs valeurs montrent que la précision est maintenue inférieure à 2 % malgré des variations dans les erreurs relatives du niveau d'oxygène allant de 6%, 17%, 20%, 26% et 45%. Cela appuie l'idée qu'il y a un autre facteur d'influence expliquant l'erreur ou la variabilité obtenue sur les résultats.

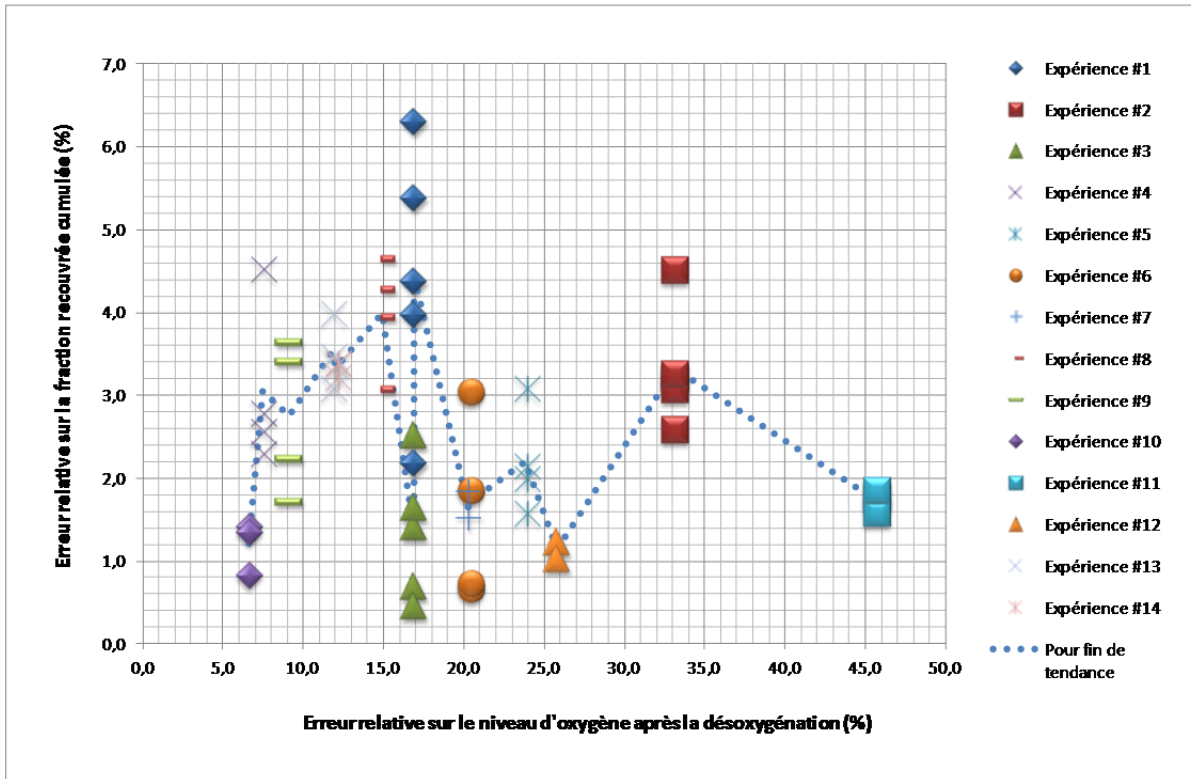


Figure 4.14 Relation entre la variance de la fraction recouvrée cumulée et celle du niveau de désoxygénation

En résumé, les deux figures montrent que le contrôle obtenu durant ce projet sur la désoxygénation initiale s'est avéré suffisant pour ne pas invalider l'approche analytique adoptée. La désoxygénation n'est donc pas un paramètre trop sensible si réalisée avec une précision raisonnable. Noter que les figures permettent également de définir une fenêtre cible à atteindre concernant la précision de futures expériences. Il est raisonnable d'espérer une précision sur la fraction recouvrée cumulée inférieure ou égale à 2% pour une précision de désoxygénation suivant les deux aspects inférieure ou égale à 5%.

Ceci établi, quel pourrait être ce ou ces autres facteurs expliquant principalement la variabilité observée sur les résultats? Il faut plutôt regarder du côté de l'erreur associée aux manipulations de l'expérimentateur et des problématiques physiques associées au pilote. La figure 4.15 donne de l'information à ce sujet à travers l'évaluation cette fois de l'écart-type et de l'erreur relative sur la fraction recouvrée de l'oxygène retirée initialement.

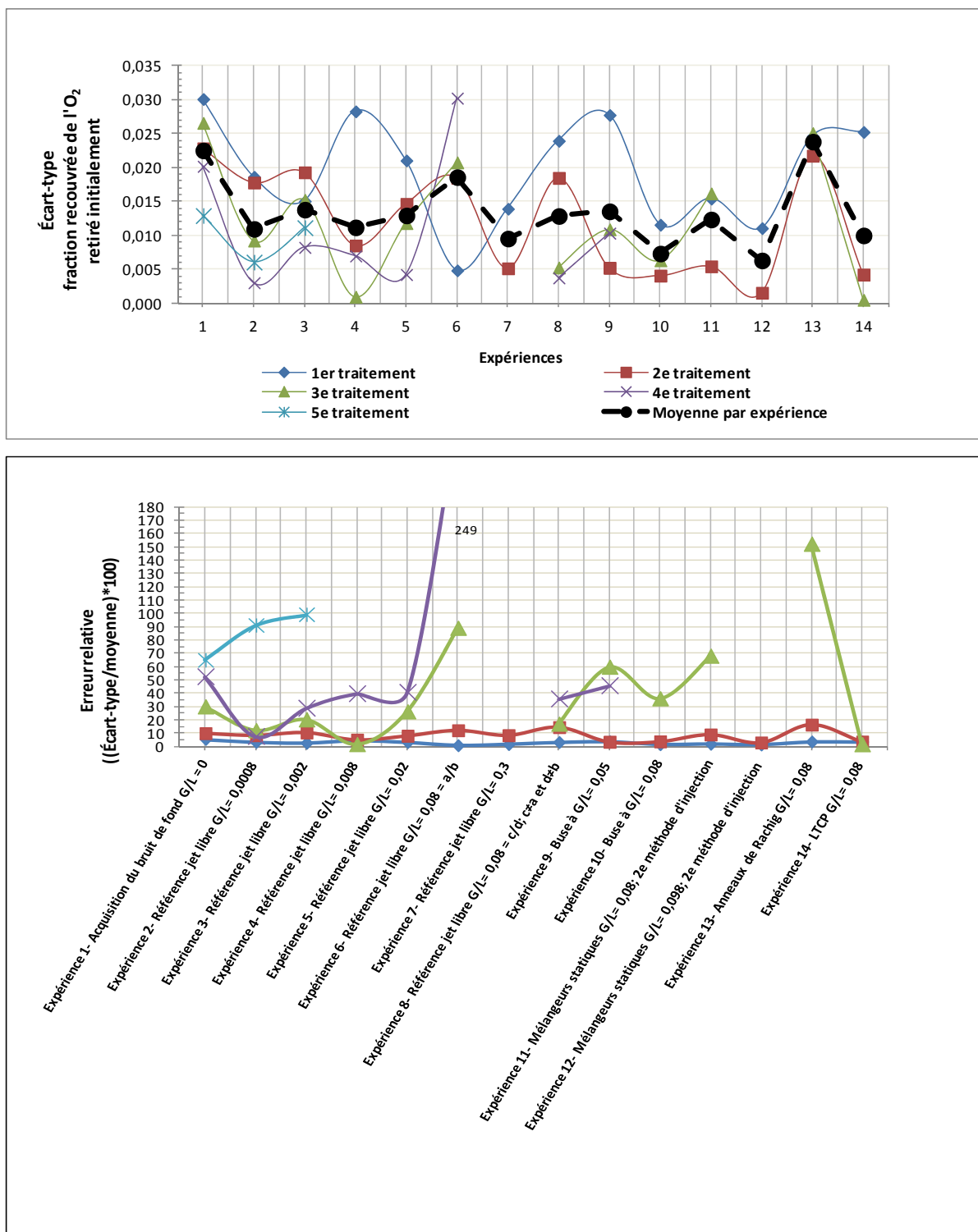


Figure 4.15 Analyse sommaire de la variance de la fraction recouverte à chaque traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée

Tout d'abord, une des principales observations sur cette figure est que l'erreur expérimentale d'une expérience à l'autre est plutôt constante alors qu'elle varie davantage d'un traitement successif à l'autre dans une même expérience. C'est ce que la courbe en pointillée de la moyenne par expérience permet de visualiser en la comparant aux courbes de chacun des traitements. Elle permet aussi de soutirer de l'information concernant la qualité des manipulations réalisées par l'expérimentateur. Ces dernières ont été répétitives et le protocole appliqué avec constance et la figure en témoigne. S'il y a présence d'une erreur systématique, elle a été maintenue d'un essai à l'autre et d'une expérience à l'autre. De plus, si l'expérimentateur a gagné en contrôle du pilote avec le temps, cela ne se traduit pas par une amélioration notable des précisions observées de l'expérience #1 à l'expérience #14. En outre, ce schéma observé des écart-types indique que ce sont le ou les mêmes facteurs qui influencent l'erreur expérimentale à chaque expérience. Plus encore, ce ou ces facteurs sont affectés différemment suivant l'étape de traitement dans une même expérience expliquant la variabilité des écart-types observés. De manière générale, le deuxième traitement semble avoir été mieux contrôlé ou plus précis que le premier traitement. Si ce n'était de plusieurs entrecroisements, il serait possible de prétendre à une tendance où chaque traitement successif est mieux contrôlé par l'expérimentateur au cours d'une expérience favorisant une plus grande précision sur les fractions recouvrées. Une autre observation est que l'erreur relative est beaucoup plus grande à partir du troisième traitement. Ceci est logique dans le cadre de cette figure puisque la fraction d'oxygène recouvrée diminue à chaque traitement successif. Dès lors comme les écart-types demeurent du même ordre de grandeur, cela implique nécessairement une plus forte erreur relative. Cependant, l'expérience #2 et #4 montrent qu'il est possible d'obtenir un écart-type plus précis à chaque traitement successif de sorte de maintenir une erreur relative du même ordre de grandeur et inférieur à 5%.

Mais tout ce qui est décrit précédemment prend du sens à travers le problème de manipulation le plus important rencontré à chaque essai, peu importe l'expérience. Il est lié à l'instabilité du niveau de l'eau dans les cylindres de mesures où les sondes sont situées. L'expérimentateur doit s'assurer en fonction du moment de l'essai de bien ajuster la hauteur des cylindres sur leur support afin de maintenir un niveau d'eau adéquat et de prévenir tout

débordement ou assèchement. Le tout en lien avec la variation de la pression hydrique suivant l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir de départ. Il faut noter que l'asymétrie physique des réservoirs accentue le phénomène dans l'un des sens d'écoulement d'un réservoir vers l'autre. Lorsqu'il y a un débordement ou un manque d'eau, ceci affecte principalement la sonde de l'oxygénomètre. En raison d'un temps de réponse plutôt lent, celle-ci met un certain temps avant de réajuster adéquatement la lecture, pouvant créer d'un essai à l'autre des différences importantes. Certaines expériences se sont avérées moins problématiques à ce chapitre ainsi que certains essais dans une même expérience, mais le problème est toujours présent, ce qui semble correspondre à cette constance de l'erreur observée sur la figure.

Finalement, l'autre source de variation non négligeable à mentionner concerne l'instabilité du débit d'air au cours d'un essai. L'expérimentateur doit réajuster au besoin le débit afin de maintenir le ratio G/L visé pour l'expérience. Cet aspect devra être amélioré, car la lecture réalisée devient trop dépendante de la subjectivité de l'expérimentateur et cela peut biaiser en partie la précision réelle des débits de gaz mesurés. En cas de distraction le débit peut avoir varié significativement pendant un temps non connu de l'expérimentateur avant que ce dernier réajuste le tout. Dès lors, le poids de cette mesure n'est pas nécessairement le bon sur l'ensemble des données recueillies. Il aurait donc été nécessaire que la prise de mesure soit systématique plutôt que simplement similaire d'un essai à l'autre. Un mécanisme d'ajustement automatique ou de surveillance en continu, à la manière de ce qui a été fait pour la mesure du taux d'oxygène devrait être mis en place afin d'éliminer le plus possible le rôle de l'expérimentateur dans la lecture du débit tout au long d'un essai. En corrigeant ces deux aspects physiques associés au pilote, et en améliorant malgré tout l'aspect désoxygénation de l'eau d'essai, l'erreur expérimentale devrait s'en trouver grandement améliorée.

4.4 Capacité à interagir

Dans un premier temps, pour caractériser le temps de présence d'un agent traitant dans le pilote, deux figures sont utilisés : la figure 4.16 des débits d'eau spécifiques aux essais et la figure 4.17 du temps de résidence du traceur tel que défini dans la section méthodologie pour les essais réalisés de type « Temps de résidence ». Dans le cas des figures 4.19 et 4.20, ce sont des indicateurs associés à la distribution du marqueur dans le milieu. Par transposition, cela permet d'estimer la qualité du mélange de l'agent traitant. Il faut mentionner immédiatement que l'ANNEXE XI présentent les courbes du signal de conductivité associé au passage du marqueur pour chacun des essais de mesure du temps de résidence de chaque expérience, sauf pour l'expérience #10 en mode buse où la deuxième méthode d'injection n'avait pas encore été élaborée. Il est utile de consulter ces courbes, car c'est à partir de ces dernières que les indicateurs suivants sont définis et calculés et elles donnent un visuel comparatif de l'évolution des signaux d'un essai à l'autre et d'une expérience à l'autre. L'indicateur présenté à la figure 4.19 est la grandeur maximale atteinte par la variation du signal de conductivité due à l'injection de la solution de sulfites. Ce critère donne de l'information utile, car plus le pic du signal est élevé, plus la concentration en sulfites (marqueur) à ce moment est grande. De ceci il est déduit que la diffusion et la distribution de cette masse dans le milieu suivant le cas ne sont pas optimales. Ainsi l'objectif pour une configuration du pilote est de minimiser cet indicateur. Dans le cas de la figure 4.20, l'indicateur est appelé critère de linéarité du signal de conductivité. Il a été élaboré afin de ramener la forme observée du signal de conductivité en une mesure concise donnant de l'information sur la distribution du marqueur tout au long de l'essai, et par conséquent sur la capacité à bien mélanger. L'idée de base repose sur l'observation qu'un signal présentant un pic maximal de conductivité $\Delta\phi_{\max}$ petit et un signal qui s'étend dans le temps témoignera de la tendance à bien mélanger du pilote. En effet, si la masse de sulfites de la solution d'injection est distribuée de façon plus uniforme dans l'eau, c'est ainsi que le signal de conductivité devrait se comporter. Bref, un pic élevé observé avec une forte pente n'est pas le type de signal recherché. Afin de pouvoir comparer adéquatement chaque expérience l'une par rapport à l'autre, l'idée est de comparer chaque courbe de signal obtenu par rapport à une

distribution du même signal idéalisée. Le choix fait est d'utiliser un signal linéaire en forme de triangle. La forme du triangle modélise une diffusion latérale uniforme de la masse de sulfites à partir du pic d'injection dans les deux sens opposés de l'écoulement de l'eau, négligeant l'effet de traînée. Dans le cadre actuel, cette comparaison ne se fait pas par rapport à un standard de référence mais est plutôt auto référée au signal lui-même et calculé à partir de la valeur du pic maximal observé lors de chaque essai. Ainsi, les expériences seront comparées par rapport à leur dérive du signal idéalisé associée à leurs propres conditions internes. La méthode de calcul du critère de linéarité utilisé consiste à estimer d'abord l'intégrale sous la courbe de chaque essai pour ensuite la diviser par l'aire du triangle idéalisé en prenant comme sommet le pic de conductivité maximal et comme base le temps de résidence de l'essai. La moyenne pour l'expérience est ensuite calculée. Plus le ratio se rapproche de 1; plus le signal réel s'approche de la distribution idéale choisit dans le cadre de cette analyse, et plus il est considéré que la distribution du traceur dans le milieu est efficace. C'est évidemment une première approche de comparaison proposée, mais étant donné la reproductibilité des signaux observés dans leur forme, cette première approche de comparaison est raisonnable.

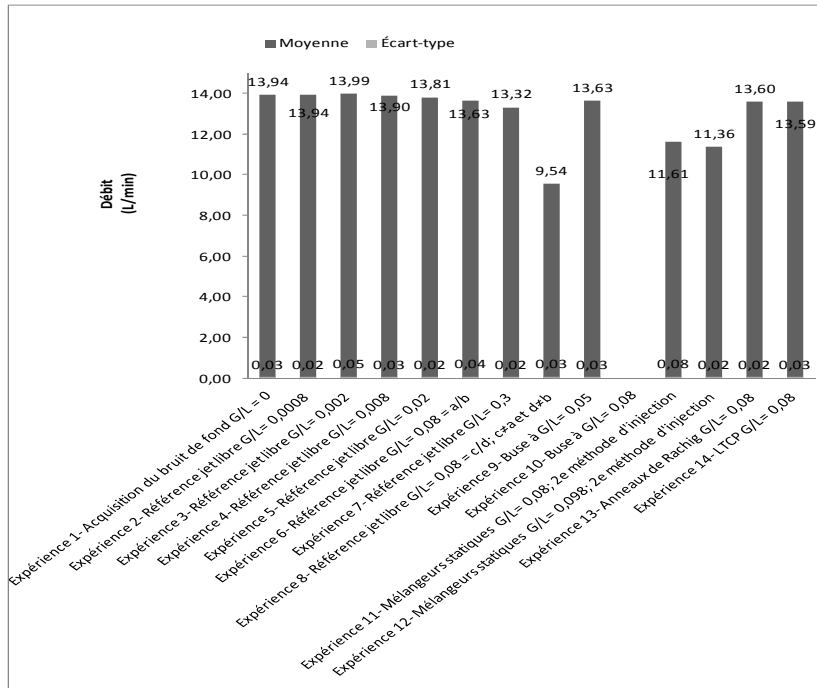


Figure 4.16 Débits d'eau spécifiques observés pour les essais de type temps de résidence (TR)

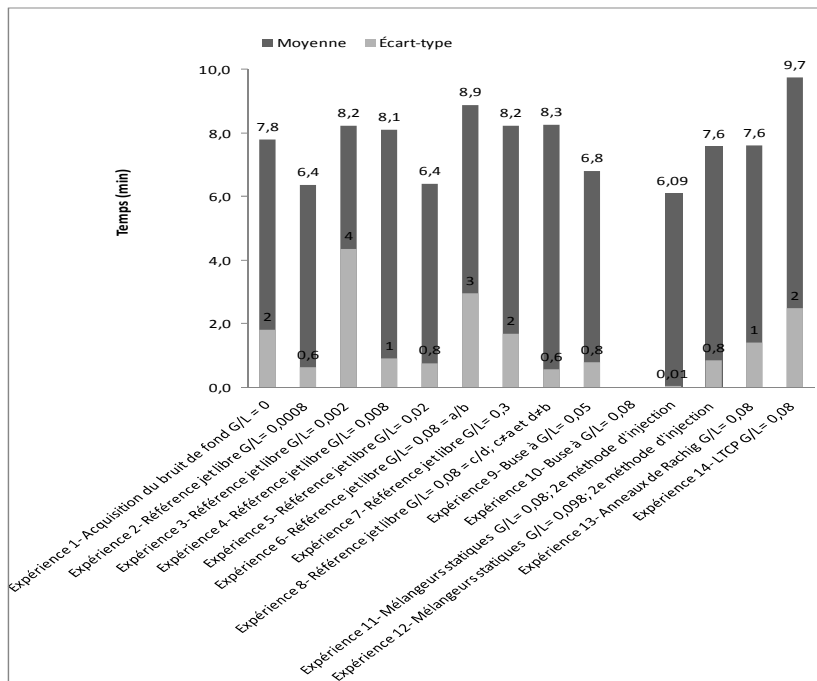


Figure 4.17 Temps de résidence (tR) du sulfite de sodium (Na₂SO_{3(s)})

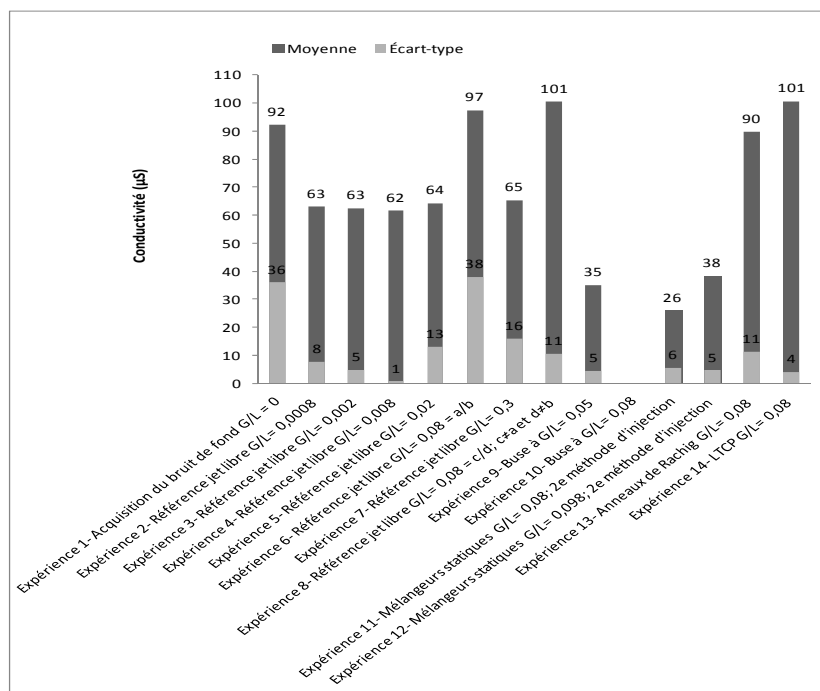


Figure 4.18 Variation maximale du signal de conductivité ($\Delta\phi_{\max_{\text{moy}}}$) due au sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$)

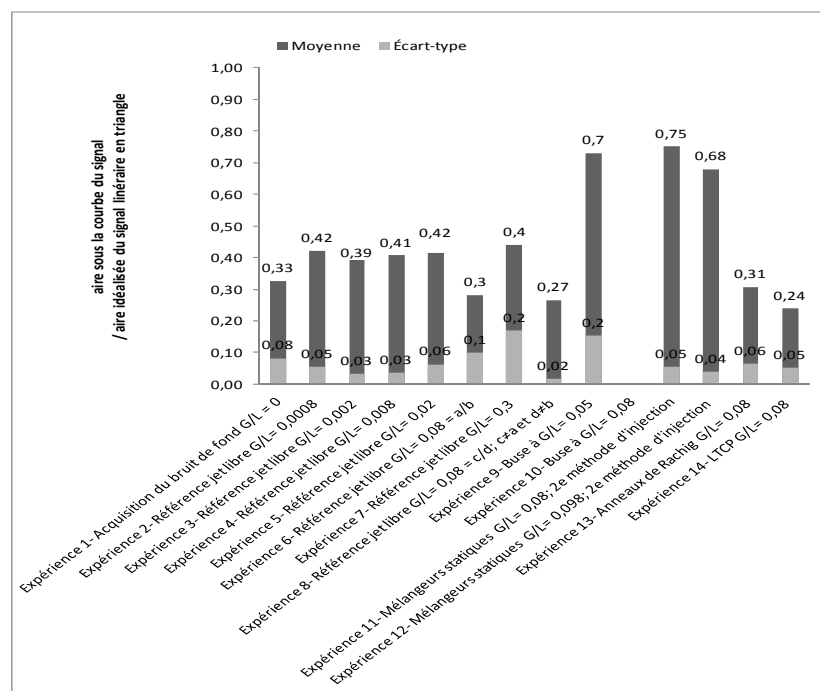


Figure 4.19 Critère de linéarité du signal de conductivité ($\approx \int / \text{Aire } \Delta_{\text{moy}}$)

Avant de regarder la signification des résultats en eux-mêmes, il est nécessaire de les valider en discutant de l'erreur expérimentale en raison d'une imprécision importante sur la plupart des indicateurs calculés. La cohérence des moyennes obtenues font en sorte que les résultats sont malgré tout de qualité suffisante pour en soutirer de l'information et des interprétations pertinentes. La plus grande difficulté provient de la figure 4.17 concernant les temps de résidence. Cette fois l'imprécision et la variation des moyennes observées dans le mode jet libre sont plus contraignantes et imposent un raisonnement plus déductif et questionnable. Cependant, ce contrôle moins grand sur la reproductibilité des résultats est cohérent avec les difficultés techniques associées aux essais de type « Temps de résidence ». En effet, outre les sources d'erreur mentionnées précédemment dans la section validation des résultats, soit l'instabilité du niveau d'eau aux sondes et celle du débit de gaz, les plus importantes ont trait à la méthode générale d'injection développée. Toutes les manipulations associées à la technique jusqu'à la fabrication de la solution d'injection sont des facteurs classiques d'erreurs et n'ont pas reçu toute la rigueur et l'optimisation nécessaires à cette étape du projet. Bien que ces aspects étaient connus et ont fait l'objet de précaution lors des expérimentations, la qualité des manipulations à ce chapitre pourrait nettement être améliorée. Un autre facteur ayant possiblement influencé concerne l'intercalation dans le protocole d'expérience de la mesure du temps de résidence entre la mesure du blanc et la mesure du zéro maximisant le temps d'utilisation d'une journée d'expérimentation et diversifiant les informations recueillies lors d'une même répétition. En contrepartie, cela n'aide pas à la répétitivité des manipulations. En réalisant davantage d'essais exclusivement de type « Temps de résidence », cela favoriserait le contrôle des facteurs d'erreur lors des manipulations. Par exemple, la préparation de la solution d'injection nécessite de toujours peser la même masse de sulfites et de toujours mesurer le bon volume d'eau. Concernant la masse pesée, le contrôle est adéquat. La concentration visée de 0,1 g/mL permet de produire un signal de conductivité suffisamment sensible. Cependant, il est difficile d'utiliser une solution standardisée pour toutes les expériences en raison des problèmes associées à l'entreposage et aux manipulations pour soutirer le volume d'injection nécessaire à chaque essai. Chaque fois que le contenant est ouvert, de l'oxygène y pénètre et affecte le pouvoir de marquage de la solution. Un compromis est réalisé alors que les solutions durent en moyenne

une semaine et sont utilisées le plus possible pour la même expérience. Concernant la mesure des volumes d'eau distillée lors de la préparation, celle-ci peut bénéficier d'une verrerie jaugée beaucoup plus précise que celle du cylindre gradué. Ce niveau de précision a été suffisant pour le contexte introductif de la méthode; il a simplifié et accéléré les manipulations exigeantes des expérimentations tout en répondant à la sensibilité du signal pour la solution. Cependant, porter une attention particulière à la fabrication, à la manipulation et à l'entreposage de la solution de marquage est un aspect important à ne pas négliger pour atteindre un niveau de précision supérieur. C'est un point qui peut faire l'objet d'un plus grand contrôle. De la même façon, la seringue utilisée pour injecter la solution n'est pas la plus précise, alors que le volume mesuré est de $10,0 \pm 0,5$ mL. Cependant, elle répond très bien aux exigences pratiques d'injection sur le pilote. Or, le volume injecté combiné à la concentration de la solution influe directement sur le type de signal observé et est une source d'erreur à contrôler. De plus, la façon dont l'expérimentateur lui-même injecte le liquide est importante et intimement lié au volume d'injection, au type de seringue autant qu'à la méthode générale d'injection. Conséquemment, n'ayant pas de méthode automatisée, l'expérimentateur doit pousser sur le piston de la seringue le plus possible de la même façon. Ceci confronte alors la méthode générale d'injection du traceur. Il s'est avéré que la première méthode développée n'était pas de nature à s'appliquer dans toutes les conditions du pilote. En effet, le port d'injection pour la solution a logiquement été situé à l'entrée de l'injecteur venturi sur le circuit de gaz en raison de l'aspiration présente. Comme il est possible de le constater sur la figure 4.2, cette aspiration n'est pas constante d'une expérience à l'autre et n'est plus présente pour les expériences #10, #11 et #12. Ceci explique d'ailleurs l'absence de résultats pour l'expérience #10 en mode buse pour les essais de mesure de temps de résidence. Cette modification de l'aspiration est négligée tant que la solution parvient à être introduite dans le système sans trop de difficulté et sans trop de différences apparentes. Toutefois, il est certain que cela affecte la vitesse d'entrée de la solution et la compacité de son volume lors de l'injection alors qu'il est souhaité que ces dernières demeurent constantes d'une expérience à l'autre. Il est difficile de quantifier sur l'erreur expérimentale l'impact de ce changement dans l'aspiration. Cependant les écart-types obtenus sur la conductivité maximale de la figure 4.18 montrent une progression de l'imprécision pour les expériences

#5 à #8 du mode jet libre, alors que l'aspiration se rapproche de sa limite. Cette problématique a conduit à l'élaboration d'une nouvelle méthode d'injection qui a été appliquée aux expériences #11 et #12 pour le mode mélangeurs statiques et pour un essai de l'expérience #13 pour en soutirer de l'information comparative. Cette nouvelle méthode aurait été applicable dans toutes les configurations du pilote et ne dépendait plus de l'aspiration au niveau de l'injecteur venturi. Elle utilise simplement les ports d'échantillonnages prévus à la sortie du circuit d'eau des réservoirs comme port d'injection. Cela a grandement stabilisé la technique d'injection pour l'expérimentateur. Seulement, cette dernière présente également un problème. Il concerne l'effet de la pompe alors que contrairement à la première méthode d'injection, la solution de marquage doit passer au travers de cette dernière. Est-ce que ce passage uniformise la distribution du marqueur de sorte de masquer tout effet étudié par rapport à une modification du pilote? Les données colligées ne sont pas suffisantes pour y répondre clairement dans l'affirmative; il faudrait recommencer les expériences en mode jet libre ou à tout le moins en mode buse (#9) à l'aide de cette deuxième méthode pour conclure à ce chapitre. En effet, l'unique essai comparatif de la figure-A XI-12 réalisé dans l'expérience #13 et fournie à l'ANNEXE XI est de nature à témoigner d'un effet écran de la pompe. Cependant, ce n'est qu'un seul essai. De l'autre côté en comparant, la figure-A XI-9 de l'expérience #9 en mode buse à la figure-A XI-10 et à la figure-A XI-11 des expériences #11 et #12 en mode mélangeurs statiques en faisant abstraction des méthodes d'injection différentes, il est possible de prétendre à un effet de brassage pour les mélangeurs similaire à celui observé pour la buse. Conséquemment, il devient difficile de départager l'effet de la pompe sur celui des mélangeurs statiques. Mais puisqu'elle est physiquement présente sur le chemin du traceur, l'interprétation privilégiée est que la pompe a un effet d'écran. En plus, une contrainte supplémentaire s'ajoute si la pompe ne fait pas partie intégrante du système de dissolution suivant la configuration souhaitée du pilote en vu du traitement de l'eau. Dès lors la deuxième méthode d'injection développée s'applique en tout temps, mais elle n'est pas plus utile si elle ne permet pas de différencier l'effet d'une modification sur le pilote. La suggestion envisagée pour le futur est une troisième méthode d'injection sur le circuit d'eau mais immédiatement à la sortie de la pompe. Déjà un port d'échantillonnage y est existant et à l'aide d'une valve anti-retour, il

serait possible de l'adapter pour y permettre l'injection. La difficulté technique concerne la pression d'eau et la valve anti-retour utilisée, mais cela réglerait définitivement le problème d'aspiration de la première méthode et de l'effet écran probable de la deuxième.

Maintenant, voici ce qui a été soutiré des résultats. La figure 4.16 des débits d'eau, analysée simultanément avec la figure 4.17 des temps de résidence, montre que la relation entre les deux n'est pas explicite. Pourtant, il est attendu que le débit soit une variable d'importance pour expliquer le temps de résidence, telle qu'à un débit d'eau plus élevé est nécessairement associé un temps de résidence plus court. Mais suivant les résultats obtenus, soit d'autres facteurs peuvent influencer et contrebalancer cette variable ou bien les contradictions proviennent de la grande imprécision des résultats. Il faut comprendre que l'objectif de performance est qu'à débit d'eau égal, une modification du pilote permet d'augmenter le temps de résidence. Mieux encore si cette dernière permet d'inverser la relation alors que l'augmentation du débit coïncide avec une augmentation du temps de résidence, ce qui implique une augmentation de la vitesse de traitement tout autant que du temps de contact. Le mode jet libre permet d'en explorer certains aspects. Un premier exemple concerne l'expérience #2 qui à $13,94 \pm 0,02$ L/min maintient un débit similaire à l'expérience #1, mais présente un temps de résidence nettement plus court à $6,4 \pm 0,6$ min par rapport à $7,8 \pm 2$ min. Comme le seul changement entre les deux expériences est l'ajout de gaz, la question se pose à savoir si c'est la cause de cette différence à la baisse pour le temps de résidence. C'est un indice plutôt contradictoire alors que l'augmentation du ratio G/L implique normalement une baisse du débit d'eau et la baisse du débit d'eau devrait entraîner une hausse du temps de résidence. L'expérience #5 n'aide pas à éclaircir l'interprétation alors qu'elle présente un débit plus lent de $13,81 \pm 0,02$ L/min, un ratio G/L plus élevé à 0,02 mais maintient un temps de résidence aussi court que l'expérience #2 et aussi précis à $6,4 \pm 0,8$ min. Est-ce que l'augmentation du ratio G/L vient compenser l'effet de la chute de débit d'eau associé de sorte que le temps de résidence devrait demeurer similaire d'une expérience à l'autre en mode jet libre? Ceci n'est pas appuyé par les expériences #3, #4, #6 et #7 qui voient leur ratio G/L augmenter mais cette fois le temps de résidence est plus élevé à $8,2 \pm 4,0$ min, $8,1 \pm 1$ min, $8,9 \pm 3$ min et $8,2 \pm 2$ minutes respectivement. De plus, cette augmentation du temps de

résidence est cette fois cohérente avec la diminution du débit d'eau observée pour ces expériences, sauf pour l'expérience #3. Cette expérience a étonnamment bénéficié du débit d'eau le plus élevé à $13,99 \pm 0,05$ L/min et son temps de résidence demeure pourtant supérieur à 8 min. Mais il est aussi le moins précis de toutes les expériences avec une erreur beaucoup trop importante pour donner du crédit au résultat. La comparaison de l'expérience #6 et de l'expérience #8 permet cependant de fixer l'effet de la variation du ratio G/L. Il est constaté que l'expérience #8, malgré son débit nettement inférieur de $9,54 \pm 0,03$ L/min maintient un temps de résidence de $8,3 \pm 0,6$ min légèrement plus court que le $8,9 \pm 3,0$ min de l'expérience #6 avec un débit de $13,63 \pm 0,04$ L/min. Il faut observer la très grande imprécision dans le cas du temps de résidence de l'expérience #6. Cependant, en acceptant l'idée que le temps résidence dans le mode jet libre se situe en moyenne autour de 8 minutes peu importe les modifications au ratio G/L, l'expérience #8 viendrait alors appuyer le fait que même une variation importante du débit de l'ordre de 4 L/min n'affecte pas substantiellement le temps de résidence. C'est une interprétation possible mais pas très conservatrice. Une interprétation diamétralement opposée se révèle si cette fois le temps moyen pour le mode jet libre est référé plutôt aux expériences #2 et #5 qui présentent un temps de résidence plus précis à 6,4 minutes. Dès lors, en comparant le résultat tout aussi précis de l'expérience #8, cette fois il est permis de conclure que l'importante variation de débit à la baisse affecte notablement à la hausse le temps de résidence observé. En poursuivant le raisonnement, l'expérience #9 en mode buse avec un ratio G/L à 0,05 a un débit d'eau très similaire à ceux observés pour le mode jet libre à $13,63 \pm 0,03$ L/min mais inférieur à l'expérience #2 et #5 et présente avec cohérence un temps de résidence de $6,8 \pm 0,8$ min légèrement supérieur et tout aussi précis. Dès lors, la faible augmentation peut être attribuée soit à l'effet de la présence de la buse ou à la légère baisse du débit, mais cela demeure cohérent comme résultat par rapport aux expériences #2, #5 et #8. L'expérience #13 avec un débit plus lent de $13,60 \pm 0,02$ L/min et l'expérience #14 à $13,59 \pm 0,03$ L/min viennent également appuyer la logique alors que leur temps de résidence sont plus élevés à respectivement $7,6 \pm 1,0$ min et $9,7 \pm 2$ min. Encore une fois la précision n'est pas très bonne, mais en prenant leur valeur de temps minimale, le raisonnement se maintient. De plus, le temps de résidence devient légèrement supérieur et la différence pourrait s'expliquer par le débit plus lent ou l'effet de l'ajout des

anneaux de Rachig ou de la modification de la longueur du tuyau de contact primaire. Évidemment, ces déductions ne sont pas très fortes.

Il faut noter que les expériences #11 et #12 en mode mélangeurs ne peuvent être comparées directement en raison de la différence dans les méthodes d'injection. Malgré tout, de l'information peut en être soutirée. Il est en effet surprenant d'observer des temps de résidence si courts. Pour ces expériences, le chemin à parcourir du traceur dans le pilote a été allongé, en raison du nouveau point d'injection utilisé et les débits sont plus bas à $11,61 \pm 0,08$ et $11,36 \pm 0,02$ respectivement. Il faut noter que la précision obtenue sur le temps de $6,09 \pm 0,01$ min de l'expérience #11 ne relève que de deux essais seulement alors que celle de l'expérience #12 avec un temps de $7,6 \pm 0,8$ min est comparable aux meilleures précisions obtenues avec la première méthode d'injection. En comparant les deux expériences, la logique demeure alors qu'à une baisse de débit une augmentation du temps de résidence est observée. Bien que l'effet de l'ajout des mélangeurs statiques ne puisse pas être comparé directement aux autres expériences, ces derniers semblent avoir peu d'influence par rapport à l'amélioration du temps de résidence alors que le temps est plus court que prévu malgré un chemin à parcourir plus grand.

En résumé, l'interprétation la plus valable à retenir de l'analyse des figures 4.16 et 4.17, en raison d'une précision suffisante, concerne tout de même deux expériences importantes. L'expérience #8 en mode jet libre avec restriction sur le débit présente un temps de résidence plus long que l'expérience #9 en mode buse. Lors d'un traitement, le fait de restreindre le débit d'eau aurait donc davantage d'impact sur l'augmentation du temps de contact que la modification entraînée par l'ajout de la buse.

D'un autre côté, l'analyse des figures 4.18 et 4.19 vise à discriminer les expériences par rapport à leur potentiel à bien distribuer ou mélanger l'agent traitant. Ce qui est recherché est une variation de la conductivité la plus petite possible sur la figure 4.18 et un critère de linéarité se rapprochant le plus possible de 1,0 sur la figure 4.19. Encore une fois, le cas des mélangeurs statiques demeurent problématique pour les fins de comparaison. Malgré cela, à

travers l'expérience #11, il présente la meilleure combinaison des indicateurs de distribution de l'agent traitant dans le milieu avec le plus bas pic de conductivité à $26 \pm 6 \mu\text{S}$ et le meilleur critère de linéarité à $0,75 \pm 0,05$. Ceci semble logique avec le rôle attribué à des mélangeurs. Cependant, le résultat le plus probant demeure celui du mode buse de l'expérience #9. La variation de conductivité maximale de $35 \pm 5 \mu\text{S}$ et le critère de linéarité de $0,7 \pm 0,2$ démontre que la buse a un effet sur la distribution du traceur. Elle présente donc le meilleur potentiel concernant le mélange et la distribution de l'agent traitant. Cette fois l'expérience #8 du mode jet libre avec restriction sur le débit ne présente pas les mêmes avantages. En fait, elle semble même moins performante que les autres expériences en mode jet libre avec sa variation de conductivité de $101 \pm 11 \mu\text{S}$, la plus élevée des expériences, et son critère de linéarité très bas à $0,27 \pm 0,02$. Donc ralentir le débit ne favorise pas le brassage, ce qui s'avère cohérent. L'expérience #14 semble posséder les mêmes désavantage mais cette fois en raison du raccourcissement de la longueur du tuyau de contact primaire avec un pic de conductivité à $101 \pm 4 \mu\text{S}$ et un critère de linéarité de $0,24 \pm 0,05$. Autrement, il faut noter que l'expérience #6 présente encore une fois un problème de cohérence et de précision par rapport aux autres expériences du mode jet libre avec un critère de linéarité plus bas que la moyenne à $0,3 \pm 0,1$ et une conductivité de $97 \pm 38 \mu\text{S}$. Les résultats en mode jet libre semblent indiquer que l'augmentation du ratio G/L semble avoir très peu d'effet quant à la distribution du mélange et que chaque expérience semble tout aussi efficace l'une que l'autre. En effet, les valeurs pour les expériences #2, #3, #4, #5 et #7, tourne en moyenne autour de $63 \pm 2 \mu\text{S}$ pour ce qui est de la variation de conductivité maximale et de $0,41 \pm 0,02$ pour ce qui est du critère de linéarité. Cependant, le mode jet libre présente un avantage de distribution par rapport à l'expérience du bruit de fond avec ses valeurs de $92 \pm 36 \mu\text{S}$ et de $0,33 \pm 0,08$. Donc l'ajout d'air a un effet sur la distribution. Encore une fois, le bruit de fond peut être utilisé comme la performance de référence qu'il est nécessaire d'améliorer. Finalement, l'ajout des anneaux de Rachig à l'expérience #13 ne semble pas davantage améliorer la performance de mélange que l'expérience #1 du bruit de fond avec des valeurs très semblables de $90 \pm 11 \mu\text{S}$ et une linéarité de $0,31 \pm 0,06$.

De manière générale, en combinant les résultats précédents sur le temps de résidence et la distribution de l'agent traitant, il est possible de conclure que le mode buse améliore de façon importante la « capacité à interagir » en comparaison des autres modes, mais possiblement partagé avec le mode mélangeurs statiques. Il faut rappeler toutefois, malgré la capacité à interagir mitigée de l'expérience #8 en mode jet libre avec restriction sur le débit d'eau, que cette dernière présente un avantage certain en termes de temps de contact et que l'augmentation du ratio G/L en mode jet libre ne semble pas avoir une influence marquée.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Dans un premier temps, du point de vue technique, il faut mentionner que le pilote construit remplit maintenant l'objectif de disposer d'un système de référence permettant la poursuite du développement technologique visant la zone de diffusion. Le pilote donne un support physique, oriente le projet de recherche et constitue un outil de travail dont les principales variables sont désormais connues et balisées. Étant donné le stade exploratoire du projet, il a été utile de le fabriquer presque entièrement de matériaux réutilisés diminuant le coût matériel et favorisant la liberté de création lorsque des modifications du pilote ont été envisagées. Tout cela sans nuire à la qualité du travail scientifique pour établir une base de données fiable. Chaque donnée ou résultat dispose d'une incertitude soit relevant de la précision de lecture d'un appareil soit défini par un calcul statistique de moyenne et d'écart-type. De même, l'utilisation de l'air comprimé et de sa fraction en oxygène demeure un choix judicieux pour évaluer la performance du pilote quant à sa capacité à dissoudre un gaz. C'est simple techniquement, peu coûteux et l'analyse directe de la masse d'oxygène dissous dans l'eau permet de comparer la performance d'une quelconque modification du pilote pouvant amener au développement d'une technologie de diffusion. Le plan d'expérience a clairement établi un mode de référence, soit le mode jet libre et un vocabulaire a été développé pour accompagner la recherche d'une modification physique avantageuse du pilote en termes de performance multicritère. Finalement, l'intégration de la caméra haute-vitesse comme un outil de mesure est acquise et une méthode simple d'analyse des fichiers photos est initiée. Cependant, pour augmenter la qualité des résultats de futures expériences, il faudra apporter certains correctifs techniques au système de mesure, à la méthode de lecture des débits d'air et à la désoxygénation de l'eau. Il faudra également apporter une attention plus grande à la technique d'analyse des photos obtenues à l'aide de la caméra haute-vitesse et à la technique d'injection pour les essais de suivis d'un traceur.

Maintenant, il faut rappeler que l'objectif à long terme justifiant la mise en place du pilote est de développer une technologie de diffusion d'un gaz dans l'eau qui soit pratique à l'utilisation et performante. Mais qu'est-ce qu'un traitement performant et quels sont les besoins associés? Ce sont là des questions en développement pour lequel le pilote devra fournir des réponses suites à des expériences ciblées afin de concevoir une technologie pouvant ultimement y répondre. Voilà pourquoi la comparaison et le choix entre différentes technologies pour un problème de traitement donné est complexe. La difficulté observée lors de la conception du plan d'expérience concernait cet aspect de la multiplicité des critères de performance pour un système physique fixé et leur interdépendance potentielle. Cela est sans compter toutes les variables physiques de base à contrôler et l'identification de celles qui s'avère indépendantes pour le pilote. Le contexte de traitement étant simplifié et général en considérant la dissolution de l'oxygène dans une eau potable.

Une distinction de langage doit immédiatement être faite pour la suite de la discussion. Le terme variable sera réservé à ce qui définit une configuration du pilote alors qu'un critère est une caractéristique générale recherchée par rapport à un besoin précis de performance. La notion de performance du pilote n'est donc pas unidimensionnelle et doit répondre à différents critères. Par exemple, une configuration du pilote devrait a priori, minimiser le temps de traitement de même que la quantité d'agent traitant utilisée. Ceci représente un avantage en termes de coût énergétique. Cependant, cela n'implique pas nécessairement une optimisation du transfert en masse de l'agent traitant ainsi que sa distribution efficace dans le milieu de manière à le rendre accessible ou apte à réagir d'un point de vue chimique. Donc répondre parfaitement ou être performant par rapport aux deux premiers critères mentionnés ne signifie pas pour autant bien traiter l'eau, car rien ne garantit que les molécules chimiques soient transformées adéquatement. La prétention commerciale d'être performant et efficace est associée à cette perspective afin d'éviter de ne cibler qu'une propriété particulièrement avantageuse du système dans des conditions très spécifiques, mais qui ne tient pas compte de l'ensemble des critères ou des autres conditions rencontrées. Un exemple grossier serait par exemple de prétendre, sans autre spécification, que le pilote est arrivé à transférer dans le mode jet libre 100% de l'oxygène ajouté et qu'il est donc très performant dans ce mode.

Cependant, cela s'avère erroné s'il est omis de mentionner que la masse d'agent traitant ajouté à ce moment était faible, ce qui explique l'obtention d'un transfert si élevé, et probablement insuffisant pour un traitement adéquat de l'eau alors que la présence en masse de l'oxygène est en réalité déficiente par rapport à d'autres modes. Ce point a d'ailleurs été discuté dans l'analyse de la figure 4.11 concernant l'efficacité de transfert. Le fait est que la performance du pilote doit être vue suivant une perspective d'équilibre entre divers critères et l'optique est de trouver la combinaison la plus avantageuse. Il existe donc de multiples critères de traitement qui peuvent être évalués suivant une logique de performance qui leur est propre et une importance également qui n'est pas nécessairement la même. Cela devient rapidement complexe, car il y a un défi de langage et de perspective. Par exemple, il est possible d'imaginer une configuration du pilote extrêmement performante en terme de traitement chimique de l'eau, mais qui va consommer énormément d'énergie et qui est difficile à manipuler pour un opérateur. Est-ce toujours une configuration performante? Le même problème de définition se répète à chaque fois qu'un terme est trop générique et peut s'expliquer par d'autres sous-critères. Par exemple, il est voulu naturellement qu'une configuration du pilote ait une excellente capacité à oxygéner mais qu'est-ce que cela signifie et comment elle s'évalue? Dès lors des sous-critères sont apparus telles la capacité à dissoudre ou la capacité à saturer pour être plus précis lorsqu'il est affirmé qu'une configuration a une meilleure capacité à oxygéner qu'une autre. Il faut bien voir que l'objectif est de séparer le concept de performance en sous-critères les plus indépendants possibles de sorte que leur combinaison permettra de discriminer la notion de performance du pilote ou de la technologie sous-jacente. Ce projet a initié ce travail et présente certainement des incongruités à ce chapitre, mais il est nécessaire de le mettre à l'avant plan. Ce travail de logique doit progresser et s'améliorer afin de faciliter la compréhension et éviter de mauvaises conclusions. Un parallèle naturel avec le langage mathématique de logique des ensembles, de relations et de fonctions pourrait être appliqué plus rigoureusement. Deux critères principaux de performance sont définis pour évaluer les configurations testées du pilote, soit la capacité à oxygéner et la capacité à interagir. Dès lors, il faut voir qu'une configuration optimisant les deux sera considérée plus avantageuse. Mais est-ce qu'une bonne capacité à oxygéner implique nécessairement une bonne capacité à

interagir et vice-versa? Voici le genre d'incongruité potentielle. Advenant le cas, il pourrait devenir obsolète d'évaluer le critère capacité à interagir, car il serait une implication logique directe de la capacité à oxygéner. Cependant, les expériences menées à l'aide du pilote ont permis de montrer qu'il ne faut pas prendre pour acquis cette implication logique et qu'aucun des deux critères ne suffit à expliquer l'autre. La capacité à oxygéner est ensuite subdivisée en sous-critères de performance qui vont en combinaison définir la qualité de cette dernière. Ce sont la capacité à dissoudre, la capacité à saturer, le temps de traitement, la masse d'agent traitant utilisé au total et son efficacité de transfert. Dans le cas de la capacité à interagir, c'est le temps de résidence et la distribution dans le mélange qui sont les sous-critères évalués pour la qualifier à partir des données obtenus. Pour circonscrire ces deux grands critères et sous-critères, les différents paramètres ou variables physiques du pilote sont suivis et mesurés, dont le taux d'oxygène de l'eau et le signal de conductivité d'un traceur. C'est à partir de ces données recueillies que les critères sont caractérisés pour comparer les différents modes du pilote et l'analyse spécifique a été présentée dans la section précédente. Voici les faits saillants d'importance à retenir de façon plus générale.

Tout d'abord, il est évident qu'il existe des modifications physiques avantageuses pour le pilote qui favorise sa performance globale et il y a un intérêt à les trouver. Une preuve sans équivoque est fournie à ce titre en comparant l'expérience #12 en mode mélangeurs statiques qui est une simple modification de la zone de contact primaire de l'expérience #7 en mode jet libre de référence. L'expérience #12 maintient une capacité à dissoudre et à saturer pratiquement équivalente à l'expérience #7, qui est la plus performante à ce chapitre, mais en utilisant moins d'agent traitant par litre d'eau traité et en le transférant de manière plus efficace dans le milieu. De plus, cette modification contribue à un meilleur mélange ou distribution de l'agent traitant favorisant une meilleure capacité à interagir que le mode jet libre de l'expérience #7. Les seuls désavantages concernent le temps de traitement qui sera plus long pour l'expérience #12 et un coût matériel supplémentaire. Cet exemple valide l'approche adoptée pour le plan d'expérience de cibler des modes associés à de telles modifications physiques simples. L'ajout de mélangeurs statiques confirme que la zone de contact primaire a une influence sur la performance du pilote. Ceci est renforcé par

l'information tirée du mode LTCP qui témoigne du peu d'avantages à écourter la longueur du tuyau de cette zone, alors que la capacité à oxygéner demeure plutôt similaire à celui du mode jet libre et qu'en comparaison la capacité à interagir semble empirer. Restreindre la longueur du tuyau équivaut à limiter les modifications à la configuration interne de cette zone, par exemple par l'ajout de mélangeurs, et réduit d'autant le sens pratique d'une telle opération. La question qui demeure concerne alors le fait d'allonger le tuyau au delà de la longueur de référence du mode jet libre, bref d'augmenter la taille de la zone de contact primaire sur le pilote. Une projection en ce sens semble indiquer qu'il y a un réel avantage mais de nouvelles expériences devraient être réalisées pour en établir les limites. Augmenter l'importance de la zone de contact primaire devrait également offrir un outil pour répondre adéquatement à l'une des observations intéressante émergeant des expériences réalisées sur le pilote. En effet, il y a un intérêt à ce que la modification mécanique apportée à ce dernier favorise l'augmentation et la distribution uniforme de la pression le long du circuit d'eau. Ceci peut passer pour une déduction logique, mais il est utile de la mettre concrètement en évidence. Pour les trois modes de l'expérience où la capacité à oxygéner a surclassé toutes les autres, soit le mode avec mélangeurs statiques, le mode avec buse et le mode jet libre avec restriction sur le débit d'eau, une modification de la distribution interne de la chute des pressions le long du circuit est clairement identifiable. D'un autre côté, le mode buse a témoigné que la modification de la zone du diffuseur présente aussi un intérêt marqué. En effet, simplement en modifiant l'embout du tuyau de sortie de contact primaire, il est possible d'atteindre de meilleures performances de la capacité à oxygéner, proches de celles obtenues par l'ajout des mélangeurs tout en offrant l'une des meilleures capacités à interagir, ce qui s'avère être le genre de combinaison recherchée. Noter qu'il est naturel d'entrevoir la zone diffuseur comme la limite de la zone de contact primaire ou comme la zone de transition entre deux zones de contact. Ainsi, il devient plutôt évident que la prochaine étape consisterait à vérifier si la combinaison des mélangeurs et de la buse amplifie l'avantage réciproque des performances de l'un et de l'autre.

Un autre aspect mis en évidence par les expériences en mode buse et mélangeurs, tout autant qu'en mode jet libre où le ratio G/L culmine à l'expérience #7, concerne l'utilité réelle de

l'injecteur venturi lorsque le gaz est ajouté sous pression. Cette question pourrait rapidement être traitée à l'aide du pilote. Sans réfléchir, l'idée initialement prise pour acquise lors de la conception du pilote était que plus l'aspiration est forte ou plus la pression est négative, meilleure sera la dissolution. Toutefois, cette idée simpliste, en apparence logique, ne passe pas le test de l'observation et des résultats. En fait, un raisonnement plus assumé conduit à penser que de créer une dépression n'est pas réellement ce que l'on souhaite d'un point de vue physique. Certes plus le vide créé est important, plus la force exercée sera grande pour attirer les molécules du gaz vers le liquide qui y pénétreront alors à une vitesse plus grande. En contrepartie, il y a un goulot d'étranglement qui serait physiquement observable si le tuyau ne résistait pas à cette pression négative sur sa paroi interne réduisant virtuellement la surface à travers laquelle le gaz peut circuler et entrer en contact avec la phase liquide et limitant également la masse de gaz maximale pouvant simultanément la traverser. Du point de vue du gaz dans son environnement à volume fixé, une pression négative signifie une pression inférieure à la jauge et par conséquent, une présence massique en moles moins importante. Suivant ces explications, il devient alors cohérent d'observer qu'une augmentation de la pression dans la zone d'injection favorise en réalité la dissolution de l'oxygène au détriment d'une augmentation en valeur absolue de la pression négative et de l'aspiration. Les expériences témoignent clairement qu'une présence en masse accrue du gaz à l'injection améliore la performance de la capacité à dissoudre. En effet, faire croître le ratio G/L consiste à augmenter la proportion de la phase gazeuse par rapport à la phase liquide en augmentant le débit du gaz, et donc sa présence en masse par litre d'eau traité. Une augmentation en masse devrait signifier une augmentation de la pression au niveau de la zone d'injection et c'est bien ce qui est observé à travers la courbe des pressions à l'injecteur. Bien qu'elle décrit une situation d'équilibre thermodynamique, la loi de Henry pour les solutions diluées idéales peut venir appuyer l'explication qui semble maintenant évidente. Cette dernière décrit le fait qu'à une augmentation de la pression de vapeur d'un soluté au-dessus d'un solvant correspond une augmentation de la masse dissoute du soluté dans le solvant. En appliquant cette description à une photo instantanée de la situation se produisant dans la zone de l'injection, l'équilibre dynamique favorisera alors la dissolution si la pression augmente.

Il faut ensuite combiner cette perspective au niveau de la zone d'injection à une autre observation très importante, qui relève d'une expérience anodine ajoutée à la dernière minute dans le plan d'expérience et qui concerne la restriction sur le débit d'eau en mode jet libre (l'expérience #8). Tout d'abord, cette expérience maintient le même ratio G/L que l'expérience #6 alors que le débit d'air et d'eau sont plus lents. Cependant, la pression de gaz observée à l'injecteur est plus élevée, ce qui est cohérent avec la performance en capacité à oxygéner plus grande de l'expérience #8. Cette pression plus élevée s'explique par un effet venturi moins important en raison du débit d'eau plus lent, mais cette expérience permet aussi de questionner le ratio G/L comme critère de performance bien défini. En effet, les expériences en mode jet libre ont démontré que plus le ratio G/L augmente plus cela favorise la performance en terme de capacité à oxygéner, mais qu'en contrepartie, l'efficacité de transfert de la masse d'agent traitant diminue alors que la masse totale ajoutée pour le traitement augmente. Il y a donc une inefficacité croissante de l'utilisation de l'oxygène ajoutée, ce qui peut être vu comme de l'inefficacité énergétique ou du gaspillage d'agent traitant. Il existe donc un ratio G/L optimal à trouver entre la capacité à oxygéner versus l'efficacité de transfert et la masse totale d'agent traitant utilisé dans un mode donné. Une hypothèse née lors de l'analyse de la figure 4.11 consiste à aligner le ratio G/L pour l'unité de traitement à réaliser sur l'espace qui est disponible dans le milieu pour la dissolution de l'oxygène. Toutefois, elle est à vérifier et elle fait poindre pour une première fois dans la discussion le concept de modulation du pilote. Mais ce n'est pas le seul facteur à évaluer. En effet, la comparaison de l'expérience #8 avec l'expérience #6 montre qu'en fait, pour un même ratio G/L donné mais obtenu à partir de régimes de débits d'eau et de gaz différents, la performance du pilote n'est pas nécessairement la même. L'expérience #6 est presque identique à l'expérience #8 à la différence près que les débits d'eau et de gaz sont plus élevés alors qu'il n'y a pas de restriction physique d'appliquer; seul le débit de gaz est ajusté pour obtenir le même ratio G/L. Cependant, la performance de l'expérience #8 s'est avérée supérieure par rapport à la capacité à oxygéner, sans présenter de distinction évidente suivant la précision des résultats pour ce qui est de la capacité à interagir, sauf peut-être une moins bonne capacité à mélanger. Elle montre que ralentir les débits de gaz et d'eau l'un par rapport à l'autre favorise la capacité à oxygéner par rapport au régime maximal offert par la

pompe sans restriction sur le débit d'eau. Il y aurait donc un avantage à restreindre le débit d'eau de sorte d'augmenter le temps de contact entre les deux phases pour un même ratio G/L. Une piste d'interprétation proposée utiliserait un concept de « résonance » appliqué au fait de rapprocher le déplacement des deux phases mobiles que sont l'eau et le gaz suivant les vitesses naturelles de diffusion de l'oxygène d'une phase à l'autre. Il faut noter un parallèle évident avec le langage utilisé dans les processus d'échanges dans les techniques de séparation utilisés en chimie analytique. Le rapprochement n'est d'ailleurs pas inutile pour des améliorations futures du pilote. Bref, il existe une courbe de performance intrinsèque à un ratio G/L donné suivant les différents régimes de débits pouvant être fixés entre les deux phases. Toutefois, cela complexifie la recherche du ratio G/L optimal pour de meilleures conditions de traitement. En effet, est-ce que le ratio G/L le plus performant déterminé pour un mode donné sans restriction sur la pompe demeure le même lorsque l'on admet tous les régimes possibles de débits pour tous les ratios accessibles? Par exemple, s'il est supposé que le ratio G/L à 0,08 dans le mode jet libre sans restriction sur le débit d'eau est celui qui optimise la performance du pilote dans ce mode. Est-ce que les restrictions sur le débit d'eau accessibles pour tous les autres ratios pourraient faire en sorte que le ratio G/L de 0,08 n'est plus cet optimum? Immédiatement, une autre question fondamentale émerge et consiste à savoir si le ratio G/L est également un critère universel de performance pour n'importe lequel mode du pilote. Bref trouver celui qui optimise la performance du mode jet libre revient à le faire pour tout autre mode du pilote. Les expériences menées jusqu'à maintenant sont insuffisantes pour répondre à ces interrogations. Il y a donc tout un travail fondamental à mener sur cette question de la performance relié au ratio G/L. La perspective demeure cependant toujours la même, il faut voir comment l'optimisation de ce critère pour un mode donné du pilote affecte tous les autres critères de performance recherchés de sorte de trouver la meilleure combinaison globale.

Maintenant, il y a un dernier aspect qui n'a pas encore été soulevé et il concerne la modification de la zone de contact secondaire. Une seule expérience a été planifiée à ce chapitre dans le plan d'expérience pour en explorer l'impact potentiel. A priori, les résultats obtenus semblent montrer que le mode avec anneaux de Rachig n'apporte rien de plus en

comparaison du mode jet libre de référence en terme de performance générale. Il serait possible de croire que l'expérience s'est avérée inutile; mais en fait, il n'en est rien. Un peu à la manière de l'expérience #8, cette dernière expérience soulève un monde de possibilités en raison d'un résultat pour le moment anecdotique. En effet, à travers l'analyse des résultats, il a été admis que pour une eau d'essai aux propriétés chimiques et physiques identiques, la capacité à saturer pouvait varier d'une configuration du pilote à l'autre, peu importe le nombre de traitements réalisés pour retrouver le niveau de saturation initiale de l'eau d'essai. Il est possible d'argumenter que l'existence de cette propriété ne relève que de l'erreur expérimentale associée à la différence dans les conditions thermodynamiques de l'eau d'essai qui ne sont pas vraiment les mêmes d'une expérience à l'autre expliquant les différences observées. Toutefois, rien n'est moins certain en raison du résultat inférieur obtenu pour le mode avec anneaux de Rachig.

En effet la question revient à demander si les moyennes obtenues pour chacune des expériences sont significativement différentes pour admettre l'existence d'une propriété autre appelée la capacité à saturer. Or en appliquant un test de comparaison des moyennes par rapport à la valeur absolue de $0,89 \pm 0,03$ de l'expérience #13 avec anneaux de Rachig, il est constaté que dans le cadre actuel de précision des expériences, seules celles présentant une moyenne supérieure ou égale à 0,95 et un écart-type inférieur ou égale à $\pm 0,02$ sont considérées significativement différentes. Cela donne donc sept expériences sur quatorze. En effet, chaque moyenne relève de trois répétitions et il est supposé que les deux expériences comparées possèdent la même variance de population. Pour quatre degrés de libertés et un niveau de confiance de 95%, la valeur dans une table du paramètre t de Student est de 2,776. La valeur calculée du t de Student pour une moyenne comparée de $0,95 \pm 0,02$ résulte à 2,882. Comme le t calculée est supérieure à la valeur de la table, la différence est considérée significative. Il est donc raisonnable d'envisager la capacité à saturer comme une réelle propriété pouvant se démarquer d'une configuration à l'autre. Une augmentation du nombre de répétition des expériences ainsi qu'une amélioration quant à l'erreur expérimentale devrait pouvoir jeter davantage de lumière sur ce sujet. C'est ainsi qu'une hypothèse intéressante est soulevée concernant le rôle potentiel des anneaux sur cette capacité à saturer nettement

inférieure, mais aussi sur la légère diminution de la capacité à dissoudre si comparée à l'expérience #6 du mode jet libre. Est-ce que les anneaux pourraient agir à la manière de « capsule de rétention », emprisonnant de l'oxygène à leur surface par adsorption et transformant ainsi l'équilibre de transfert vers l'eau? Et si tel est le cas, pourraient-ils jouer un rôle de catalyseur de réactions chimiques en vue du traitement oxydatif de l'eau, favorisant la rencontre ou le contact des molécules pour fin de traitement? Cette idée de support est connue et utilisée dans d'autres types de traitement mais devient tout à fait intéressante si appliqué en plus à l'idée d'emmagasiner dans le milieu des réserves supplémentaires d'oxygène pouvant être utilisées pour amplifier l'efficacité du traitement. Il est possible de développer plusieurs types d'expériences à l'aide du pilote pour valider cette hypothèse. Mais qu'importe, la réflexion apportée par les anneaux de Rachig s'est avérée instructive.

Pour terminer la discussion, une dernière observation plutôt intéressante concerne l'expérience #1 appelée le bruit de fond. Malgré le fait qu'il n'y ait aucun gaz d'ajouté, cette configuration du pilote permet tout de même de réoxygéner l'eau en cinq traitements successifs en moyenne alors que le premier traitement accomplit 56 ± 3 % du travail de récupération de la masse d'oxygène retirée. Ce travail est toujours présent pour toute expérience réalisée avec le pilote, d'où l'appellation de bruit de fond. La figure 4.10 permet de visualiser en quelque sorte le travail supplémentaire réalisé par les autres expériences à traitement égal. Le point à mentionner ici est que plus il y a de traitements successifs nécessaires moins il y a de différence par rapport au travail qu'aurait fait le bruit de fond pour réoxygéner l'eau après le même nombre de traitements. Cette observation engendre la question suivante : pourquoi poursuivre dans une configuration du pilote, alors qu'il y aurait à tel moment du traitement un avantage à exploiter une autre configuration? À titre d'exemple grossier, sans en mesurer la pertinence, pour un traitement donné en mode jet libre, pourquoi ne pas amorcer le premier traitement suivant la configuration de l'expérience #7 pour ensuite poursuivre le traitement en faisant tourner le pilote en mode bruit de fond jusqu'à saturation? L'objectif par cet exemple est d'introduire tout l'intérêt de travailler sur l'aspect modulation du pilote.

CONCLUSION

Il existe une multiplicité de système pour dissoudre un gaz dans l'eau dans un objectif de traitement de contaminants. Leur utilisation va dépendre de leur performance globale par rapport à un problème pratique donné. L'objectif général de ce travail est d'établir un cadre de référence pour développer une technologie de dissolution d'un gaz simple à l'utilisation et performante. Pour ce faire, un pilote est construit et calibré. Une configuration de base du pilote est définie, le mode jet libre. Ensuite, différentes configurations (mode buse, mode mélangeurs statiques, mode avec anneaux de Rachig, mode LTCP) modifiant un aspect de diffusion du mode jet libre sont testées pour en comparer les avantages. Différents essais de réoxygénation et de suivi d'un traceur sont réalisés suivant différents ratio G/L (v/v). Différents critères de comparaison sont établis à partir de la masse d'oxygène dissous à chaque passage du même volume déterminé d'eau, par le suivi d'un traceur et l'utilisation de la caméra à capture rapide. Il faut retenir principalement que l'augmentation du ratio G/L dans le mode jet libre augmente la capacité à oxygéner. En contre partie, l'efficacité de transfert de la masse d'oxygène ajouté par litre d'eau traité diminue. La taille moyenne des bulles observées augmente avec le ratio G/L tout autant que leur irrégularité de forme. Pour une première étape de réoxygénation de l'eau d'essai à un ratio G/L de 0,08, la comparaison de la capacité à dissoudre par rapport au bruit de fond montre que le mode jet libre est $(19,0 \pm 0,5)$ % plus performant suivi par le mode jet libre avec restriction sur le débit d'eau à (22 ± 2) %. L'ajout d'une buse fait passer ce pourcentage à (26 ± 1) % et l'ajout de mélangeurs statiques à (31 ± 2) %. Le mode avec anneaux de Rachig produit l'effet inverse et abaisse le pourcentage à (15 ± 2) % alors que le fait de raccourcir la zone de contact primaire (mode LTCP) maintient une performance autour de (18 ± 3) %. Autre observation pour cette même étape, l'efficacité de transfert de l'oxygène ajouté par litre d'eau traitée est de (7 ± 3) % pour le mode jet libre, de (16 ± 2) % pour le mode jet libre avec restriction, de (19 ± 1) % pour le mode buse, (23 ± 1) % pour le mode avec mélangeurs statiques, (11 ± 2) % pour le mode anneaux de Rachig et (13 ± 2) % pour le mode LTCP. Le mode buse et celui des mélangeurs statiques favorisent le mélange du traceur et la capacité à interagir. De même les pressions d'eau observées dans ces deux modes témoignent de l'intérêt à distribuer cette pression le

long du circuit d'eau et d'augmenter la pression du gaz. Bref, il y a un intérêt à poursuivre le travail sur la zone de diffusion du gaz pour développer une technologie et sa performance doit être évaluée suivant la combinaison optimale de multiples critères. Pour la suite, il est suggéré de tester le fait d'allonger la zone de contact primaire du pilote, de mesurer l'effet combiné de la buse et des mélangeurs statiques et de vérifier la réelle utilité de l'injecteur venturi lorsque le gaz est injecté sous pression. Le cas des anneaux de Rachig est à approfondir suivant l'hypothèse de rétention de l'oxygène à la surface des plaques tout autant que le travail amorcé à l'aide de la caméra à capture rapide comme outils de mesure de la distribution et de la taille des bulles. En terminant, moduler le pilote et ses configurations suivant une évolution des conditions physicochimiques représente une perspective de recherche à explorer du point de vue efficacité énergétique pour la suite du développement.

ANNEXE I

DONNÉES BRUTES POUR L'ÉTALONNAGES DES MANOMÈTRES

Voici un exemple de données brutes recueillies lors de l'étalonnage du manomètre F situé sur la ligne de gaz.

Tableau-A I-1 Données brutes pour construire la courbe d'étalonnage du manomètre F

| Nombre d'essais n : | 56 | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Pression mesurée (kPa) | Poids de calibration (kPa) | Pression mesurée (kPa) | Poids de calibration (kPa) | Pression mesurée (kPa) | Poids de calibration (kPa) | Pression mesurée (kPa) | Poids de calibration (kPa) |
| 5 | 0 | 45 | 45 | 83 | 80 | 160 | 160 |
| 5 | 0 | 45 | 45 | 82 | 80 | 160 | 160 |
| 9 | 5 | 49 | 50 | 91 | 90 | 170 | 170 |
| 9 | 5 | 49 | 50 | 92 | 90 | 170 | 170 |
| 15 | 10 | 53 | 50 | 101 | 100 | 182 | 180 |
| 15 | 10 | 53 | 50 | 102 | 100 | 183 | 180 |
| 20 | 15 | 59 | 55 | 114 | 110 | 193 | 190 |
| 20 | 15 | 59 | 55 | 112 | 110 | 193 | 190 |
| 24 | 20 | 63 | 60 | 121 | 120 | | |
| 25 | 20 | 65 | 60 | 122 | 120 | | |
| 30 | 25 | 70 | 65 | 133 | 130 | | |
| 30 | 25 | 69 | 65 | 131 | 130 | | |
| 35 | 30 | 72 | 70 | 143 | 140 | | |
| 35 | 30 | 72 | 70 | 141 | 140 | | |
| 40 | 35 | 78 | 75 | 151 | 150 | | |
| 40 | 35 | 78 | 75 | 151 | 150 | | |

ANNEXE II

ÉTALONNAGE DU DÉBITMÈTRE POUR L'EAU

Exemple d'une partie de la feuille de calcul utilisée pour établir la droite d'étalonnage du débitmètre. Il contient les conditions d'expérimentations, un exemple de données brutes recueillies pour les deux premiers points de la courbe.

Tableau-A II-1 Exemple des données recueillies pour deux points de mesure de la droite d'étalonnage du débitmètre pour l'eau

| | | | | | | |
|--|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Essais | #1 à 8 | date | 03/10/2011 | | | |
| Conditions d'expérimentation | Heure début | 14h04 | | heure fin | | |
| | Lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente | lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente |
| Pression atmosphérique (kPa) | 101,78 | 101,73 | 101,84 | | | |
| Température Laboratoire (°C) | 22 | | | | | |
| Humidité relative laboratoire (%) | 56% | | | | | |
| Température eau (°C) | 21 | | | | | |
| | | | | | | |
| Estimation du rayon moyen de la colonne: | | | | | | |
| | ± 0,1 cm | | Diamètre moyen estimé | Rayon moyen estimé | | |
| | 20,25 | | | 10,13 | | |
| Diamètre de la colonne mesuré | 20,30 | moyenne | 20,3 | 10,15 | moyenne | 10,14 |
| | 20,30 | écart-type | 0,03 | 10,15 | écart-type | 0,01 |

| Point pour la courbe | N° de l'essai | Temps mesuré (s) | Hauteur de la colonne d'eau (dm) | Volume d'eau calculé (L) | Débit affiché (L/min) | Débit calculé (L/min) | |
|----------------------|---------------|------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | | 11,0 | | |
| | | 22 | 1,50 | 4,847 | 11,1 | 13,219 | |
| | | 42 | 3,00 | 9,694 | 11,0 | 13,848 | |
| | | 64 | 4,50 | 14,541 | 11,0 | 13,632 | |
| | | 84 | 6,00 | 19,387 | 11,0 | 13,848 | |
| | | 105 | 7,50 | 24,234 | 11,0 | 13,848 | |
| | 2 | 2 | 0 | 0 | | 11,0 | |
| | | | 22 | 1,50 | 4,847 | 11,0 | 13,219 |
| | | | 42 | 3,00 | 9,694 | 11,0 | 13,526 |
| | | | 64 | 4,50 | 14,541 | 11,1 | 13,632 |
| | | | 84 | 6,00 | 19,387 | 11,0 | 13,685 |
| | | | 105 | 7,50 | 24,234 | 11,0 | 13,848 |
| 2 | 3 | 0 | 0 | | | | |
| | | 29 | 1,50 | 4,847 | 8,2 | 10,028 | |
| | | 57 | 3,00 | 9,694 | 8,2 | 10,204 | |
| | | 85 | 4,50 | 14,541 | 8,2 | 10,264 | |
| | | 114 | 6,00 | 19,387 | 8,2 | 10,204 | |
| | | 142 | 7,50 | 24,234 | 8,2 | 10,240 | |
| | 4 | 4 | 0 | 0 | | 8,1 | |
| | | | 29 | 1,50 | 4,847 | 8,2 | 10,028 |
| | | | 57 | 3,00 | 9,694 | 8,2 | 10,204 |
| | | | 85 | 4,50 | 14,541 | 8,2 | 10,264 |
| | | | 115 | 6,00 | 19,387 | 8,2 | 10,115 |
| | | | 143 | 7,50 | 24,234 | 8,2 | 10,168 |

ANNEXE III

MÉTHODE D'ÉTALONNAGE DES DÉBITMÈTRES POUR LE GAZ

Le problème de fiabilité et de contrôle sur la qualité des lectures apparaît lors de la mise en place de la section de mesure des débits de gaz sur le pilote. Tout d'abord, le choix s'est arrêté sur trois modèles de débitmètres différents permettant de couvrir le spectre de débits visés pour les différentes expérimentations à mettre en place. L'un est nommé «fa» alors qu'il sert à la mesure de faibles débits, le second est noté «mo» pour la mesure de débits moyens et le dernier «Fo» associé aux forts débits de gaz. Les débitmètres sont usagés et la fiabilité de leur échelle de mesure souffre de l'usure du temps et d'une calibration d'usinage prédéfinie suivant une gamme de pression, une température et d'un gaz donné (O₂, N₂, CO₂) pas nécessairement le même. L'objectif devient alors de coordonner leurs échelles de mesure en fonction d'une référence bien contrôlée et si possible, donnant des valeurs exactes de débits suivant les paramètres spécifiques au pilote lors des expérimentations. La première option est d'utiliser différents débitmètres de référence dont la méthode de calibration interne est la même et servant uniquement à étalonner d'autres appareils. La deuxième option est d'acheter de nouveaux débitmètres et de faire confiance aux paramètres d'usine avec formule de correction si disponible pour s'ajuster aux paramètres laboratoire du pilote et coordonner les échelles entre elles. Il y a ici un problème de dépendance technique et matériel mais aussi de rapport à la confiance et au contrôle dont dispose l'expérimentateur sur les lectures. Que ce soit un débitmètre de référence ou neuf; le contrôle de la référence est externe et les conditions de fonctionnement prédéterminés n'offrent pas nécessairement toute la gamme de précision souhaitée en fonction des conditions expérimentales spécifiques. Bref il faut connaître à l'avance les conditions et acheter le matériel en conséquence. Il serait plus intéressant si le matériel disponible pouvait être adapté suivant les conditions d'expériences. C'est un exemple où le matériel impose ses limitations à l'expérience et la conditionne. Dans les conditions de réalisation du projet, il devenait utile de disposer d'une méthode «maison» d'étalonnage qui soit simple, d'application générale, permettant de référer aux conditions de laboratoire tout en unifiant les échelles de mesure des débitmètres. Cette dernière pouvant

alors être critiquée, améliorée et reproduite par un autre expérimentateur. En voici donc une première ébauche validée. Tout d'abord, la première étape consiste à construire une courbe de référence pour le paramètre physique mesuré servant à établir ultimement le débit d'air lors de l'étalonnage des débitmètres à même le pilote. Le paramètre physique choisit est le diamètre transversal maximal d'un ballon gonflable. Suivant le diamètre mesuré du ballon, un volume de gaz précis peut lui être associé. Il faut donc établir initialement la courbe caractéristique du diamètre du ballon en fonction du volume de gaz ajouté. Pour mesurer le diamètre du ballon, deux équerres en métal et une règle ont été utilisés à la manière d'un vernier. Pour ajouter le volume de gaz dans le ballon, une seringue de 60 ± 1 mL est utilisée. En voici le montage :

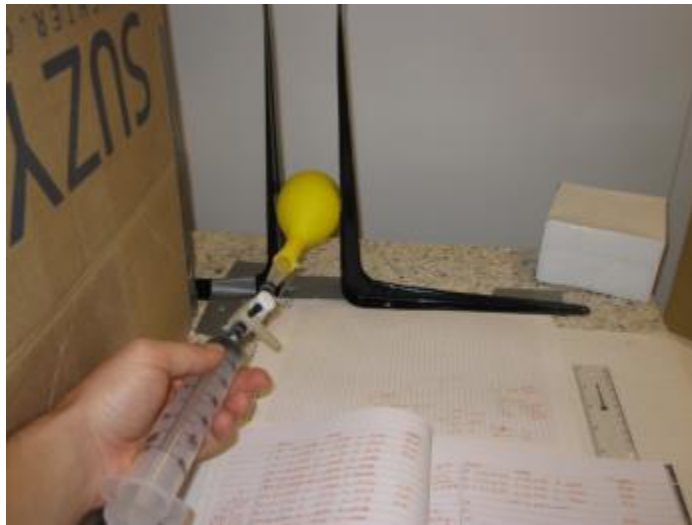


Figure-A III-1 Montage pour l'établissement de la courbe du diamètre du ballon en fonction du volume de gaz

Il faut préciser que le gaz est ajouté par unité de 60 mL à la fois. Pour s'assurer d'une plus grande exactitude sur cette unité de volume injecté, la seringue est étalonnée. Pour ce faire, 60 mL d'eau distillée est aspirée et ensuite pesée pour en connaître la masse. La température de l'eau est mesurée au préalable. À partir de ce moment, il faut conserver la même technique de mesure pour toute utilisation de la seringue. À l'aide de la densité de l'eau tirée d'une table de référence et choisie en fonction de la température de l'eau, il est possible d'estimer plus exactement le volume «réel» associé à la graduation de 60 mL. Évidemment,

l'hypothèse veut que le même volume de gaz soit injecté lorsque le piston de la seringue est poussé à son maximum. Dans le cas présent, dix essais sont réalisés et un exemple des données obtenues est présenté au tableau-A III-1.

Tableau-A III-1 Feuille de calcul pour l'étalonnage du volume de 60 mL de la seringue utilisée pour l'ajout d'air dans les ballons gonflables

| Densité de l'eau utilisé en g/mL: Harris, 7e édition, Quantitative Chemical Analysis; Table 2.7; page 32 | | | | | |
|--|-----------|--|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 20° C | 0,9982071 | | | | |
| 21° C | 0,9979955 | | | | |
| Température de l'eau mesurée: 20,5 ± 0,5 °C | | | | | |
| Valeur de densité de l'eau utilisée en g/mL: | | | | 0,9981013 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | Essais | | Masse d'eau pesée (g) | | Volume d'eau calculé (mL) |
| | 1 | | 58,45640 | | 58,56760231 |
| | 2 | | 58,35835 | | 58,46936578 |
| | 3 | | 58,87518 | | 58,98717896 |
| | 4 | | 58,37735 | | 58,48840193 |
| | 5 | | 58,37157 | | 58,48261194 |
| | 6 | | 58,19546 | | 58,30616592 |
| | 7 | | 58,68417 | | 58,7958056 |
| | 8 | | 58,81746 | | 58,92934916 |
| | 9 | | 58,48055 | | 58,59179825 |
| | 10 | | 58,40010 | | 58,51119521 |
| | | | | Volume moyen ajouté par la seringue | 58,6 |
| | | | | Écart-type | 0,2 |

L'unité de volume obtenue est de $58,6 \pm 0,2$ mL et c'est cette valeur qui est utilisée dans les calculs. Ceci étant fait, l'établissement de la courbe de référence se poursuit. Dans le cas présent quatre essais sont mis en place. À chaque fois, un ballon différent est utilisé pour minimiser l'influence possible de ce paramètre sur la courbe. La méthode de mesure est simple mais demande de la patience et de la minutie. Tout d'abord, le ballon, la seringue et la source du gaz sont connectés à une valve à trois voies. Cette dernière permet d'ouvrir

initialement le circuit d'air entre la seringue et la source du gaz qui dans le cas présent est l'air ambiant. En tirant sur le piston de la seringue, toujours à une vitesse modérée et constante, l'unité de volume associée à la graduation de 60 mL est aspirée. Noter que si le résultat n'est pas satisfaisant, il est simple de recommencer en expulsant l'air par le même circuit. Une fois le volume d'air prélevé, le circuit menant à la source du gaz est fermé alors que celui menant au ballon est ouvert. L'unité d'air y est expulsée. Une fois le piston de la seringue complètement repoussé; le circuit vers le ballon est refermée pour empêcher tout retour d'air. Attention de ne pas ouvrir une voie vers l'extérieur; car si de l'air s'échappe du ballon, l'essai ne peut se poursuivre pour les mesures subséquentes. Bref, c'est à ce moment que le ballon est manipulé afin d'en mesurer le diamètre à l'aide du vernier improvisé. Étant donné le niveau de précision accepté à l'utilisation des équerres et de la règle, à partir du deuxième essai le diamètre du ballon est la plupart du temps mesuré à trois reprises. L'équerre est ramenée à sa position initiale et la mesure est répétée. Noter que sur les équerres des marques réciproques ont été établies pour que la mesure à l'aide de la règle soit toujours réalisée au même endroit. C'est donc à cet endroit que le diamètre maximal du ballon est ajusté pour établir la lecture. Par la suite, le processus peut reprendre en ajoutant d'autres unités de volume successives pour créer le point de référence suivant. Sauf dans le cas du premier essai, c'est par ajout de bloc de 5 unités de volume d'air (environ 300 mL) que les points de mesures de la courbe sont réalisés. Ceci afin d'accélérer le processus et d'obtenir une variation sensible du diamètre du ballon. Voici le tableau-A III-2 présentant les valeurs recueillies pour un des quatre essais.

Tableau-A III-2 Section de la feuille de calcul servant à établir la courbe de référence du diamètre du ballon en fonction du volume d'air ajouté

| Essais | ballon #4 | date | 29/05/2011 | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Conditions d'expérimentation | Heure début | 13h24 | | heure fin | 18h30 | |
| | Lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente | lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente |
| Pression atmosphérique (kPa) | 101,42 | 101,19 | 101,44 | 101,27 | 101,19 | 101,44 |
| Température Laboratoire (°C) | 22 | | | | | |
| Humidité relative laboratoire (%) | 54% | | | | | |
| Volume d'air ajouté (unité de 60 ml) | Diamètre du ballon mesuré (cm) | Volume d'air ajouté (unité de 60 ml) | Diamètre du ballon mesuré (cm) | Volume d'air ajouté (unité de 60 ml) | Diamètre du ballon mesuré (cm) | |
| 0 | | 35 | 15,35 | 70 | 19,20 | |
| 0 | | 35 | 15,30 | 70 | 19,20 | |
| 0 | | 35 | 15,35 | 70 | 19,10 | |
| 5 | 7,85 | 40 | 15,95 | 75 | 19,50 | |
| 5 | 7,90 | 40 | 15,90 | 75 | 19,60 | |
| 5 | 7,80 | 40 | 15,95 | 75 | 19,60 | |
| 10 | 9,75 | 45 | 16,60 | 80 | 19,90 | |
| 10 | 9,80 | 45 | 16,60 | 80 | 19,95 | |
| 10 | 9,75 | 45 | 16,60 | 80 | 20,00 | |
| 15 | 11,40 | 50 | 17,10 | 85 | 20,30 | |
| 15 | 11,35 | 50 | 17,10 | 85 | 20,40 | |
| 15 | 11,40 | 50 | 17,15 | 85 | 20,35 | |
| 20 | 12,70 | 55 | 17,75 | 90 | 20,70 | |
| 20 | 12,65 | 55 | 17,70 | 90 | 20,70 | |
| 20 | 12,70 | 55 | 17,65 | 90 | 20,75 | |
| 25 | 13,65 | 60 | 18,15 | 95 | 21,10 | |
| 25 | 13,60 | 60 | 18,30 | 95 | 21,15 | |
| 25 | 13,70 | 60 | 18,25 | 95 | 21,10 | |
| 30 | 14,50 | 65 | 18,70 | 100 | 21,35 | |
| 30 | 14,50 | 65 | 18,75 | 100 | 21,40 | |
| 30 | 14,50 | 65 | 18,75 | 100 | 21,45 | |

La figure-A III-2 témoigne du comportement observé.

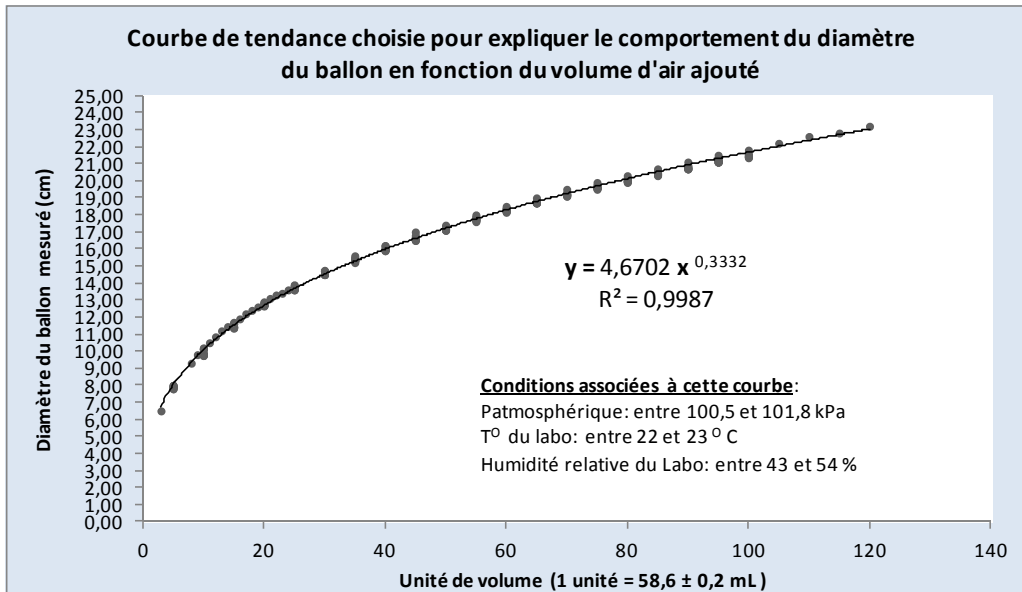


Figure-A III-2 Courbe de référence expliquant la variation du diamètre du ballon en fonction du volume de gaz ajouté

Une fonction exponentielle est choisie pour expliquer la courbe obtenue :

$$y = 4,6702 x^{0,3332} \quad (5.1)$$

où y représente le diamètre du ballon en cm et la variable x représente le nombre d'unité de volume ajouté. C'est cette dernière fonction qui est utilisée pour transformer en unités de volume les diamètres de ballon mesurés lors des essais d'étalonnage de chaque débitmètre. La régression linéaire n'est pas adaptée pour expliquer la courbe et l'ensemble des valeurs obtenues; à moins de cibler des zones précises pour lesquelles il aurait fallu restreindre les mesures lors de l'étalonnage des débitmètres. En utilisant une courbe de tendance de type exponentielle à l'aide du logiciel Excel, c'est la fonction minimisant l'erreur qui a été proposée. Cependant, pour fin de vérification une estimation de l'erreur moyenne du modèle par rapport aux points de mesures a été faite pour les deux variables. Il est à noter que cette erreur devait se rapprocher le plus possible de 0. Pour la variable y c'est une erreur moyenne

du modèle de $\pm 0,12$ cm et pour la variable x une erreur moyenne de $\pm 0,15$ unité de volume. Il est donc raisonnable d'utiliser la fonction proposée.

Pour réaliser l'étalonnage des débitmètres, il faut modifier le montage de la figure-A III-1 en l'intégrant au pilote. La seringue est alors remplacée et la valve trois voies vient s'intercaler sur la ligne de gaz menant au pilote, juste après le débitmètre à calibrer et le thermomètre pour la température du gaz. Ensuite, la continuité de la ligne de gaz vers le pilote est assurée en la connectant à l'autre embout de la valve servant précédemment à aspirer le gaz.

En premier lieu, il faut noter que les courbes d'étalonnage des trois débitmètres (f_a , m_o , F_o) sont valides pour une pression initiale jaugée de l'air comprimé fixée à $1,00 \pm 0,05$ bar; soit autour de 100 kPa jaugé. Plus la pression s'éloigne de cette valeur, plus il devient nécessaire d'établir une nouvelle courbe d'étalonnage en fonction de la nouvelle pression fixée. L'autre option est de définir une courbe des facteurs de correction de la courbe d'étalonnage suivant la pression initiale fixée pour le gaz. Pour les trois débitmètres, la méthode d'acquisition des données est la même. Tout d'abord, les conditions de température et de pression du laboratoire sont notées. Ensuite, suivant quelques tests préliminaires, le nombre de points de référence est établi pour couvrir le plus uniformément possible les graduations accessibles de l'échelle de mesure du débitmètre. Dans le cas présent, le débit de gaz est évalué pour cinq points de graduation de l'échelle. Au début d'un essai, la ligne de gaz est ouverte et la pression initiale est contrôlée par la valve sur le déhuileur pour y être fixée à un bar. Le gaz circule librement vers le pilote. À ce moment le débit est ajusté à l'une des graduations de référence choisie. La méthode de lecture sur les débitmètres est fixée à ce moment pour tout le reste des expérimentations. Dans le cas présent, elle utilise comme un ménisque le demi arc de cercle du bas de la bille qui est intégrée au cylindre gradué de l'appareil; de sorte qu'à l'équilibre, ce dernier est tangent à la graduation visée. Le ballon gonflable a été attaché au préalable sur son circuit en minimisant la présence d'air résiduel. Tout est prêt pour l'étape de mesure du débit de gaz. Il est nécessaire de porter attention aux manipulations de l'expérimentateur qui affectent la précision obtenue. La difficulté provient de la synchronisation de l'ouverture et de la fermeture de la valve trois voies permettant au gaz

d'être dirigé ou non vers le ballon avec le début et l'arrêt de l'essai de mesure. Plusieurs techniques peuvent être imaginées pour améliorer cet aspect. L'idéal serait de le rendre systématique. Celle appliquée consiste à démarrer le chronomètre au moment où l'expérimentateur ouvre la valve et à la refermer lorsque le signal sonore du compte à rebours fixé sur le chronomètre se fait entendre. En effet, la durée de gonflement du ballon est fixée à l'avance. Ce temps est testé au préalable alors qu'il permet de s'assurer que le diamètre appartienne à des valeurs sensibles de la courbe de référence. Il offre un certain contrôle sur la durée globale de l'étalonnage d'un débitmètre. De plus, cela tend à minimiser l'erreur due au temps de réaction de l'expérimentateur. Ce dernier ne s'occupe plus que de fermer la valve au moment du signal sonore. Ce temps fixé pour chaque répétition d'un essai de gonflement du ballon est considéré comme une valeur exacte dans les calculs, bien qu'il soit possible de lui associer une incertitude. Le manque de précision est ainsi restreint à deux causes principales, les manipulations de fermeture de la valve et celles de la mesure du diamètre du ballon. Ce faisant, cela permet de considérer immédiatement tout écart important dans les diamètres mesurés et de reprendre l'essai au besoin. Bref, une fois le temps échu, le ballon gonflé et la valve refermée de sorte que le gaz circule de nouveau vers le pilote; le ballon est mesuré à l'aide des équerres et de la règle de la même façon que lors de l'établissement de la courbe de référence. Le diamètre étant mesuré, ce dernier permet de connaître le volume de gaz présent à l'intérieur du ballon grâce à la courbe de référence établie au préalable. Comme le temps pour ajouter ce volume est connu, il devient possible d'estimer le débit. Noter qu'initialement le fait d'utiliser plusieurs ballons différents a été testé lors de l'étalonnage du débitmètre pour les forts débits afin de vérifier l'effet de l'étirement élastique et l'impact du gaz résiduel sur la valeur du diamètre mesurée. Le tout s'est avéré de peu d'influence dans le contexte de précision actuelle de la méthode et en regard de l'importance de l'erreur associée aux manipulations de la valve et du chronomètre lors des essais. Ainsi un seul ballon est utilisé pour les autres débitmètres afin de sauver un temps précieux suivant l'échéancier du projet.

Voici à titre d'exemple, une partie des données ayant servi à l'établissement de la droite d'étalonnage du débitmètre «Fo» pour les forts débits de gaz.

Tableau-A III-3 Section de la feuille de calcul caractérisant les essais faits avec deux des quatre ballons utilisés (Fo)

| | | | | | | |
|--|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Pour tous les essais: Pression interne max fixée au déhuieur à la sortie de la ligne de gaz comprimé | | | | | | |
| | Pint | 1*100kPa | | | | |
| Essais | ballon #1 | date | 02/06/2011 | | | |
| Conditions d'expérimentation | Heure début | 14h20 | | heure fin | 16h21 | |
| | Lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente | lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente |
| Pression atmosphérique (kPa) | 100,89 | 100,29 | 100,92 | 101,01 | 100,29 | 101,02 |
| Température Laboratoire (°C) | 22 | | | 21 | | |
| Humidité relative laboratoire (%) | 53% | | | 34 | | |
| Essais | ballon #2 | date | 06/06/2011 | | | |
| Conditions d'expérimentation | Heure début | 10h03 | | heure fin | 13h37 | |
| | Lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente | lecture | Min dans l'heure précédente | Max dans l'heure précédente |
| Pression atmosphérique (kPa) | 101,69 | 101,50 | 101,72 | 101,53 | 101,50 | 101,72 |
| Température Laboratoire (°C) | 21 | | | 21 | | |
| Humidité relative laboratoire (%) | 46% | | | 47% | | |

Tableau-A III-4 Données brutes recueillies pour les différents points de mesure (Fo)

| Valeur fixée sur l'échelle du débit-mètre (mm) | Temps mesuré (± 1 s) | ballon #1 | | ballon #2 | |
|--|---------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | | Diamètre du ballon mesuré ($\pm 0,1$ cm) | T° gaz ($\pm 1^\circ\text{C}$) | Diamètre du ballon mesuré ($\pm 0,1$ cm) | T° gaz ($\pm 1^\circ\text{C}$) |
| 30 | 25 | 9,00 | 22 | 9,25 | 21,5 |
| | | 8,90 | 22 | 9,10 | 21,5 |
| | | 9,05 | 22,5 | 9,20 | 21,5 |
| | 50 | 11,30 | 22,5 | 11,55 | 21,5 |
| | | 11,30 | 21,5 | 11,60 | 21,5 |
| | | 11,30 | 21,5 | 11,60 | 21,5 |
| | | 11,30 | 21,5 | 11,60 | 21,5 |
| 60 | 25 | 11,75 | 21,5 | 11,70 | 21,5 |
| | | 11,75 | 21,0 | 11,75 | 21,5 |
| | | 11,65 | 21,5 | 11,80 | 21,5 |
| | 50 | 14,80 | 21,5 | 14,90 | 21,5 |
| | | 14,65 | 21,5 | 15,00 | 21,5 |
| | | 14,80 | 21,5 | 15,00 | 21,5 |
| | | 14,80 | 21,5 | 15,00 | 21,5 |

| Valeur fixée sur l'échelle du débit-mètre (mm) | Temps mesuré (± 1 s) | ballon #1 | | ballon #2 | |
|--|---------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------------|
| | | Diamètre du ballon mesuré ($\pm 0,1$ cm) | T° gaz ($\pm 1^\circ\text{C}$) | Diamètre du ballon mesuré ($\pm 0,1$ cm) | T° gaz ($\pm 1^\circ\text{C}$) |
| 90 | 25 | 13,80 | 21 | 13,35 | 21,5 |
| | | 13,85 | 21 | 13,70 | 21,5 |
| | 50 | 17,25 | 21 | 17,05 | 21,5 |
| | | 17,35 | 21 | 16,95 | 21,5 |
| | | 17,50 | 21 | 17,00 | 21,5 |
| | | 15,70 | 21 | 15,20 | 21,5 |
| 120 | 25 | 16,00 | 21 | 15,10 | 21,5 |
| | | 15,85 | 21 | 15,05 | 21,5 |
| | | 19,70 | 21 | 18,60 | 21,5 |
| | 50 | 19,60 | 21 | 18,65 | 21,0 |
| | | 19,50 | 21 | 18,50 | 21,0 |
| | | 17,40 | 21,5 | 16,10 | 20,5 |
| 150 | 25 | 17,40 | 21,5 | 15,80 | 20,5 |
| | | 17,30 | 21,5 | 15,95 | 20,5 |
| | | 21,45 | 21,5 | 19,90 | 20,5 |
| | 50 | 21,60 | 21,5 | 19,80 | 20,5 |
| | | 21,30 | 21,5 | 20,05 | 20,5 |
| | | 15,85 | 21,0 | 16,10 | 21,0 |
| 150 | 25 | 16,05 | 21,0 | 16,20 | 21,0 |
| | | 16,10 | 21,0 | 16,10 | 21,0 |

Tableau-A III-5 Données calculées pour les mêmes points de mesure (Fo)

| ballon #1 | | | ballon #2 | | |
|--|---|------------------------------|--|---|------------------------------|
| Unités de volume calculés à partir de la courbe de référence ($\pm 0,3$ unités) | Débit d'air unitaire (unités de volume/s) | Débit d'air volumique (mL/s) | Unités de volume calculés à partir de la courbe de référence ($\pm 0,3$ unités) | Débit d'air unitaire (unités de volume/s) | Débit d'air volumique (mL/s) |
| 7,1625 | 0,29 | 16,8 | 7,7763 | 0,31 | 18,2 |
| 6,9263 | 0,28 | 16,2 | 7,4040 | 0,30 | 17,4 |
| 7,2826 | 0,29 | 17,1 | 7,6509 | 0,31 | 17,9 |
| 14,1804 | 0,28 | 16,6 | 15,1430 | 0,30 | 17,8 |
| 14,1804 | 0,28 | 16,6 | 15,3406 | 0,31 | 18,0 |
| 14,1804 | 0,28 | 16,6 | 15,3406 | 0,31 | 18,0 |
| 15,9437 | 0,64 | 37,4 | 15,7409 | 0,63 | 36,9 |
| 15,9437 | 0,64 | 37,4 | 15,9437 | 0,64 | 37,4 |
| 15,5399 | 0,62 | 36,4 | 16,1482 | 0,65 | 37,9 |
| 31,8699 | 0,64 | 37,4 | 32,5205 | 0,65 | 38,1 |
| 30,9102 | 0,62 | 36,2 | 33,1799 | 0,66 | 38,9 |
| 31,8699 | 0,64 | 37,4 | 33,1799 | 0,66 | 38,9 |

| ballon #1 | | | ballon #2 | | |
|--|---|------------------------------|--|---|------------------------------|
| Unités de volume calculés à partir de la courbe de référence ($\pm 0,3$ unités) | Débit d'air unitaire (unités de volume/s) | Débit d'air volumique (mL/s) | Unités de volume calculés à partir de la courbe de référence ($\pm 0,3$ unités) | Débit d'air unitaire (unités de volume/s) | Débit d'air volumique (mL/s) |
| 25,2765 | 1,01 | 59,3 | 25,5543 | 1,02 | 59,9 |
| 25,8342 | 1,03 | 60,6 | 23,3876 | 0,94 | 54,8 |
| 26,1162 | 1,04 | 61,2 | 25,2765 | 1,01 | 59,3 |
| 50,4710 | 1,01 | 59,2 | 48,7351 | 0,97 | 57,1 |
| 51,3542 | 1,03 | 60,2 | 47,8823 | 0,96 | 56,1 |
| 52,6983 | 1,05 | 61,8 | 48,3074 | 0,97 | 56,6 |
| 38,0474 | 1,52 | 89,2 | 34,5255 | 1,38 | 80,9 |
| 40,2713 | 1,61 | 94,4 | 33,8482 | 1,35 | 79,4 |
| 39,1488 | 1,57 | 91,8 | 33,5130 | 1,34 | 78,6 |
| 75,1870 | 1,50 | 88,1 | 63,2780 | 1,27 | 74,2 |
| 74,0474 | 1,48 | 86,8 | 63,7899 | 1,28 | 74,8 |
| 72,9193 | 1,46 | 85,5 | 62,2625 | 1,25 | 73,0 |
| 51,7997 | 2,07 | 121,4 | 41,0314 | 1,64 | 96,2 |
| 51,7997 | 2,07 | 121,4 | 38,7793 | 1,55 | 90,9 |
| 50,9113 | 2,04 | 119,4 | 39,8948 | 1,60 | 93,5 |
| 97,0667 | 1,94 | 113,8 | 77,5012 | 1,55 | 90,9 |
| 99,1182 | 1,98 | 116,2 | 76,3383 | 1,53 | 89,5 |
| 95,0437 | 1,90 | 111,4 | 79,2677 | 1,59 | 92,9 |
| 39,1488 | 1,57 | 91,8 | 41,0314 | 1,64 | 96,2 |
| 40,6502 | 1,63 | 95,3 | 41,8010 | 1,67 | 98,0 |
| 41,0314 | 1,64 | 96,2 | 41,0314 | 1,64 | 96,2 |

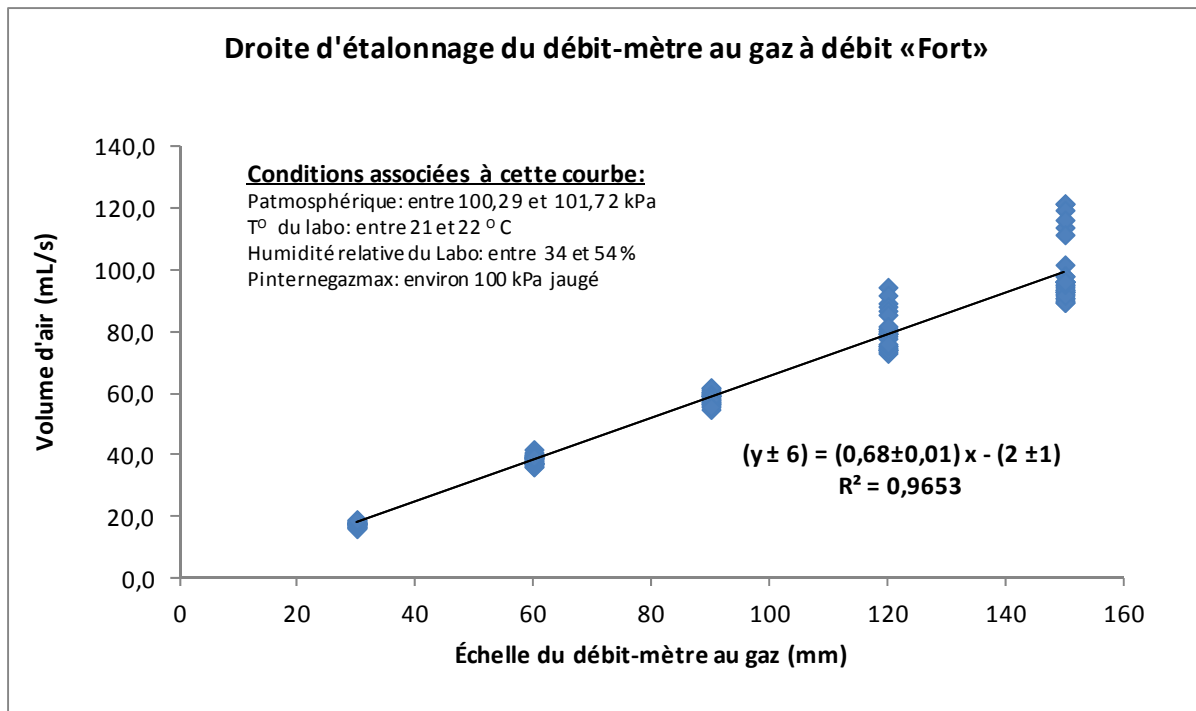


Figure-A III-3 Courbe d'étalonnage pour le débitmètre «Fo» pour la mesure des débits de gaz considérés élevés

ANNEXE IV

NOTES SUR LA MÉTHODE DE DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU

Voici une partie du travail préliminaire réalisé afin de contrôler la méthode chimique de désoxygénation de l'eau d'essai. Deux problèmes fondamentaux ont fait obstacle initialement. Une incapacité à réoxygéner l'eau une fois celle-ci désoxygénée et l'utilisation d'une trop grande quantité de sulfites si appliquée proportionnellement à des volumes d'eau de l'ordre de ceux des réservoirs du pilote. L'explication envisagée suggérait l'utilisation initiale d'un excès de sulfites de sodium. Le premier objectif a donc consisté à trouver une réaction chimique permettant d'estimer théoriquement la quantité de sulfites suffisante et nécessaire pour désoxygéner l'eau complètement. Par la suite, des tests empiriques ont permis de valider l'équation et la nouvelle méthode à appliquer en vue de contrôler suivant les besoins la désoxygénation de l'eau d'essai. Certaines réflexions utiles ont été initiées lors de cette étape; particulièrement en lien avec l'impact de la modification chimique de l'eau d'essai et de la basification observée lors de la réoxygénation. Les expériences consistent à prendre un volume d'eau à température pièce d'approximativement 250 mL et d'en mesurer le taux d'oxygène, le pH et la température. Ensuite, peser exactement environ le quart du 0,07623 g/L de sulfites théoriquement calculé à partir de l'équation établie et l'ajouter au bécher en brassant. Le temps nécessaire pour désoxygéner est noté et les paramètres de température, de pH et d'oxygène dissous sont ensuite mesurés. Finalement, un bullage à l'aide d'un simple tuyau d'air comprimé est réalisé dans le bécher pour tester la réoxygénation. Les paramètres sont de nouveaux mesurés après un temps d'environ 5 minutes. Les observations soutirées indiquent que la désoxygénation n'est pas complète mais que le taux d'oxygène est abaissé autour de 2 à 3 mg/L. La température demeure stable. Il y a une basification pendant la désoxygénation et elle se poursuit lors de la réoxygénation. Conséquemment, la méthode est valide et donne les résultats escomptés. Il devient possible de contrôler la désoxygénation de l'eau d'essai lors des expérimentations et une équation chimique en oriente maintenant l'application.

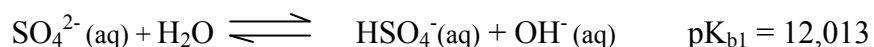
Tableau-A IV-1 Exemple de tests empiriques réalisés le 8 juillet 2011 pour valider l'utilisation de la méthode de désoxygénation.

| Étape de l'essai | O ₂ dans l'eau (mg/L) | pH | T° de l'eau (°C) | Volume d'eau (mL) | Masse de sulfites pesée (g) |
|---|----------------------------------|------|------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1- Mesure du Blanc (eau initiale) | 7,88 | 7,37 | 22,6 | 250 | |
| 2- Désoxygénation (ajout de sulfite et brassage pendant 10 min) | 2,50 | 7,62 | 22,6 | | 0,0174 |
| 3- Réoxygénation (bullage d'air pendant 5 min) | 7,87 | 7,95 | 22,7 | | |

Pistes de réflexion

- est-ce que la variation de la force ionique due à la modification de la composition ou de la concentration des espèces ioniques en solution peut affecter substantiellement l'équilibre de dissolution de l'oxygène dans l'eau? La taille des ions en solution aqueuse en lien avec leur hydratation affecte l'arrangement spatial et l'entropie associée à cette organisation. Cela devrait avoir un impact sur la capacité du milieu à hydrater les molécules d'oxygène ou d'un autre gaz à ajouter. Tout cela a été exploré sous le regard des coefficients d'activités en lien avec l'équation de Debye-Huckel pour une force ionique inférieure à 0,1 M.
- hypothèse proposée pour le phénomène de basification observée lors de l'ajout du sulfite de sodium dans l'eau d'essai :

La base de l'explication concerne les réactions d'équilibre acido-basiques, plus particulièrement de celles associées à l'acide sulfurique H₂SO₄. L'explication est que l'ajout de sulfite de sodium provoque une augmentation de la concentration en ions sulfates SO₄²⁻ en solutions. De sorte que l'équilibre de la réaction suivante est poussé vers les produits (Harris, 7^e édition) :



Cette équation est déduite de la deuxième équation de dissociation de l'acide sulfurique donnée par :



Un calcul théorique est possible alors pour vérifier cette hypothèse. Dès lors le rapport de 2010 de la ville de Montréal (voir ANNEXE IX) permet de connaître une des concentrations observées en moyenne dans l'eau de la ville en ions sulfates SO_4^{2-} . La valeur donnée est de 24 mg/L, ce qui donne une concentration molaire d'environ 0,00025 mol/L. À cette concentration initiale, il est ajouté l'apport dû aux sulfites de sodium. En supposant que ces derniers sont complètement transformés en ions sulfates et en prenant la concentration molaire théorique calculée dans la section méthodologie de 0,000605 M de sulfates pour désoxygéner un taux d'oxygène moyen de 9,68 mg/L. Supposons également un pH mesuré similaire à l'essai #1 ci-haut présenté de 7,37. Dès lors, il est possible de calculer les nouvelles concentrations à l'équilibre après l'ajout du sulfite en utilisant $\text{p}K_{b1}$ et de calculer ensuite le nouveau pH.

Initialement : $[\text{SO}_4^{2-}] = 0,000855$ $[\text{OH}^-] = 10^{(14-7,37)}$ $[\text{HSO}_4^-] = \text{négligé}$

Final à l'équilibre : $[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{éq}} = 0,000855 - x$ $[\text{OH}^-]_{\text{éq}} = 10^{(14-7,37)+x}$ $[\text{HSO}_4^-]_{\text{éq}} = x$

Équation à résoudre : $K_{b1} = 10^{-12,013} = [\text{OH}^-]_{\text{éq}}[\text{HSO}_4^-]_{\text{éq}} / [\text{SO}_4^{2-}]_{\text{éq}} = (10^{(14-7,37)+x}) x / (0,000855 - x)$

Résultats : $x = 2,4 \cdot 10^{-7}$ mol/L ; $[\text{OH}^-]_{\text{éq}} = 4,24 \cdot 10^{-7}$ mol/L ; $\text{pOH} = 6,37$; **pH = 7,63**

Le résultat est plutôt cohérent avec le pH mesuré après désoxygénation de l'eau d'essai dans l'essai #1 présenté ci-haut. Maintenant, il faudrait expliquer pourquoi la réoxygénation pousse la basification plus avant encore. Une des hypothèses envisageable est que l'ajout d'oxygène favorise la complétion réelle de la consommation des ions sulfites restant augmentant davantage la concentration d'anions hydroxydes de par la réaction des ions sulfates avec l'eau.

ANNEXE V

**MESURES DE CORRECTION DU TAUX D'OXYGÈNE EN RAISON DE LA
VARIATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU**

Cette partie concerne l'augmentation de la température de l'eau à chaque passage dans le pilote et l'établissement d'une courbe permettant de corriger le taux d'oxygène en le ramenant à sa valeur à une température de référence de 23 degrés Celsius.

Tableau-A V-1 Section de la feuille de données des températures moyennes mesurées de l'eau pour chaque type d'essai des deux premières expériences

| Température moyenne de l'eau expérimentalement observé lors des essais en degrés celsius | | | | | | |
|--|------------------------|-------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Type d'essai --> | | | Blanc | | Zéro | |
| Passages dans le Pilote ou répétition d'un même essai --> | | | 1 | | 1 | |
| Nom de l'expérience | Numéro de l'expérience | Série d'essais | Valeur | ± | Valeur | ± |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond | 1 | 1 | 23,07 | 0,25 | 24,42 | 0,13 |
| | | 2 | 21,99 | 0,03 | 23,18 | 0,04 |
| | | 3 | 20,69 | 0,17 | 22,14 | 0,07 |
| | | 4 | 23,83 | 0,20 | 24,58 | 0,20 |
| | | 5 | 23,12 | 0,13 | 23,90 | 0,40 |
| | | moyenne | 22,68 | 0,18 | 23,76 | 0,20 |
| | | écart-type | 1,37 | 0,05 | 1,12 | 0,14 |
| Référence jet libre G/L= 0,0008 | 2 | 2 | 22,58 | 0,04 | 23,69 | 0,37 |
| | | 3 | 22,50 | 0,12 | 23,49 | 0,03 |
| | | 4 | 22,14 | 0,05 | 23,67 | 0,08 |
| | | moyenne | 22,41 | 0,07 | 23,62 | 0,16 |
| | | écart-type | 0,23 | 0,04 | 0,11 | 0,18 |

| Réoxygénation | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------|---|--------|---|
| 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | |
| Valeur | ± | Valeur | ± | Valeur | ± | Valeur | ± | Valeur | ± | Valeur | ± | Valeur | ± |
| 24,78 | 0,05 | 24,94 | 0,40 | 25,51 | 0,18 | 25,71 | 0,41 | | | | | | |
| 24,31 | 0,36 | | | | | | | | | | | | |
| 22,66 | 0,23 | 23,23 | 0,11 | 23,76 | 0,14 | 24,28 | 0,05 | 24,55 | 0,26 | | | | |
| 25,09 | 0,25 | 25,44 | 0,20 | 25,70 | 0,39 | 26,28 | 0,20 | 26,71 | 0,21 | | | | |
| 24,57 | 0,09 | 24,95 | 0,11 | 25,36 | 0,06 | 25,67 | 0,06 | 26,08 | 0,04 | | | | |
| 24,27 | 0,15 | 24,64 | 0,20 | 25,08 | 0,19 | 25,49 | 0,18 | 25,78 | 0,17 | | | | |
| 1,10 | 0,10 | 0,97 | 0,14 | 0,90 | 0,14 | 0,85 | 0,16 | 1,11 | 0,11 | | | | |
| 24,46 | 0,06 | 24,87 | 0,05 | 25,28 | 0,04 | 25,65 | 0,21 | 25,96 | 0,08 | | | | |
| 24,00 | 0,00 | 24,50 | 0,05 | 25,04 | 0,05 | 25,47 | 0,06 | 25,99 | 0,04 | | | | |
| 24,24 | 0,09 | 24,54 | 0,33 | 25,15 | 0,10 | 25,52 | 0,13 | 25,94 | 0,12 | | | | |
| 24,23 | 0,05 | 24,64 | 0,14 | 25,16 | 0,06 | 25,55 | 0,13 | 25,96 | 0,08 | | | | |
| 0,23 | 0,05 | 0,20 | 0,16 | 0,12 | 0,03 | 0,09 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | | | | |

| Temps de résidence | | | | |
|--------------------|--------------|--------|------|--------------------------------|
| 1 | | 2 | | Moyenne globale par expérience |
| Valeur | ± | Valeur | ± | |
| 23,90 | 0,16 | | | |
| 22,65 | 0,05 | | | |
| 21,44 | 0,17 | | | |
| 24,29 | 0,05 | | | |
| 23,67 | 0,06 | | | |
| 23,32 | 0,11 | | | 24 |
| 1,28 | 0,07 | | | 1 |
| 23,10 | 0,05 | 23,54 | 0,05 | |
| 23,05 | 0,05 | | | |
| 23,27 | 0,05 | | | |
| 23,24 | 0,050 | | | 24 |
| 0,22 | 0,003 | | | 1 |

Tableau-A V-2 Feuille de calcul permettant d'établir l'augmentation de température moyenne de l'eau par passage dans le pilote

| Nom de l'expérience | Numéro de l'expérience | Série d'essais | Différence de température en degrés celsius entre deux passages successifs | | | | | | | | | | Moyenne /passage/ expérience (°C) | |
|--|------------------------|----------------|--|---------|----------|---------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------------|------|
| | | | Blanc--TR | TR--TR | TR--Zéro | Zéro--1 | 1--2 | 2--3 | 3--4 | 4--5 | 5--6 | 6--7 | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond | 1 | 1 | 0,82 | | 0,53 | 0,36 | 0,16 | 0,57 | 0,20 | | | | | |
| | | 2 | 0,66 | | 0,53 | 1,13 | | | | | | | | |
| | | 3 | 0,75 | | 0,70 | 0,52 | 0,57 | 0,52 | 0,53 | 0,27 | | | | |
| | | 4 | 0,46 | | 0,30 | 0,51 | 0,35 | 0,26 | 0,58 | 0,43 | | | | |
| | | 5 | 0,55 | | 0,23 | 0,67 | 0,38 | 0,41 | 0,32 | 0,41 | | | | |
| | moyenne | | 0,65 | | 0,44 | 0,51 | 0,36 | 0,44 | 0,41 | 0,37 | | | | 0,49 |
| | écart-type | | 0,17 | | 0,22 | 0,13 | 0,17 | 0,14 | 0,18 | 0,09 | | | | 0,17 |
| Référence jet libre G/L= 0,0008 | 2 | 2 | 0,52 | 0,44 | 0,14 | 0,78 | 0,41 | 0,41 | | | | | | |
| | | 3 | 0,55 | | 0,44 | 0,51 | 0,50 | 0,54 | 0,43 | 0,51 | | | | |
| | | 4 | 1,13 | | 0,40 | 0,57 | 0,30 | 0,61 | 0,37 | 0,42 | | | | |
| | | moyenne | | 0,73 | 0,44 | 0,33 | 0,62 | 0,40 | 0,52 | 0,40 | 0,47 | | | |
| | écart-type | | 0,41 | #DIV/0! | 0,03 | 0,04 | 0,15 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | | | | 0,20 |

Voici maintenant un exemple du formulaire utilisé pour transférer les données acquises dans le cadre de l'établissement de la courbe de correction. Elle permettront de construire la droite de régression en vue d'estimer la dérivée. Pour obtenir ces données, le montage consiste en une plaque chauffante, un bécher, la sonde à oxygène, celle mesurant le pH et d'un agitateur magnétique. L'essai se déroule en mesurant environ 400 mL d'eau d'essai ciblant une température initiale autour de 19 °C. Le thermostat de la plaque est ajusté à 30 °C afin d'éviter que l'eau se réchauffe trop vite n'offrant pas suffisamment de temps aux sondes et à l'eau d'ajuster leur équilibre. Les essais sont arrêtés lorsque la température atteint environ 28°C. L'agitateur sert à uniformiser et favoriser le transfert de chaleur et d'oxygène tout en assurant les mêmes conditions de mesure du taux d'oxygène dissous à une vitesse de 300 tours par minute.

Tableau-A V-3 Formulaire modifié pour la compilation des données des essais de la variation du taux d'oxygène en fonction de la variation de température de l'eau

| CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRIQUES | | | |
|---|--|--------------|----|
| <i>Note : Les zones ombragées sont celles nécessitant l'ajout de valeurs et les valeurs soulignées des liens hypertextes.</i> | | | |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | Courbe de correction expérimentale O2 dissous vs Température | | |
| No DE L'EXPÉRIENCE | Non définie | | |
| No DE LA SÉRIE D'ESSAIS | 2 | | |
| CATÉGORIE DE L'ESSAI | Courbe de référence | | |
| No RÉPÉTITION DE L'ESSAI | 4 | | |
| DATE | 2012-01-04 | | |
| No CAHIER LABORATOIRE | 4 | pages | 83 |
| CONFIGURATION PILOTE | non impliqué; montage extérieur | | |

| ÉTALONNAGE DES SONDÉS ET STABILITÉ POUR LA JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION | | | | | | |
|---|------------------------|-----|-----------------------------|-----|----------------------|-----|
| PARAMÈTRES | SONDES | | | | pH | |
| | O2 dissous | | Eau de référence à T° pièce | | Étalonnage réussi | |
| | Milieu 100% humide | | | | | |
| | Début | Fin | Début | Fin | | |
| [O2] (mg/L) | 8,73 | | 9,17 | | Conductivité | |
| [O2] (%) | 100,0 | | 105,4 | | Étalon de KCl 0,01 M | |
| Patm (kPa) | 101,1 | | 101,1 | | Début | Fin |
| T° (°C) | 22,0 | | 22,1 | | 22,0 | |
| (µS) | | | | | 1422 | |
| FICHER FILM CONTENANT LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES D'INTÉRÊT DE CET ESSAI | | | | | | |
| | <u>1. Lien Imaloga</u> | | 2. Sauvegarde | | | |
| 1. Films des expériences\Les BLANCS\Jet libre\2012-01-04_sondesvsvariationtemperature_004.AVI | | | | | | |

| SECTION OXYGÈNE DISSOUS, TEMPÉRATURE, pH MESURÉS (tiré du fichier film) | | | | | | |
|---|---------------------------|-------------------------|--------|-----------------|------------|--|
| Temps écoulé du film | [O ₂] dissous | Température de l'eau | pH | ΔO ₂ | ΔT | Pente de la tangente (ΔO ₂ /ΔT) |
| (± 1 s) | (± 0,2 mg/L) | (± 0,3 °C) | ± 0,01 | (± 0,3 mg/L) | (± 0,4 °C) | |
| 0 | 9,08 | 22,6 | 7,89 | | | |
| 30 | 9,05 | 22,7 | 7,89 | -0,03 | 0,10 | 0,300 |
| 60 | 9,05 | 22,7 | 7,89 | 0,00 | 0,00 | |
| 90 | 9,04 | 22,7 | 7,89 | -0,01 | 0,00 | |
| 120 | 9,04 | 22,8 | 7,89 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 150 | 9,01 | 22,8 | 7,89 | -0,03 | 0,00 | |
| 180 | 9,01 | 22,9 | 7,91 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 210 | 9,00 | 22,9 | 7,91 | -0,01 | 0,00 | |
| 240 | 8,99 | 23,0 | 7,91 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 270 | 8,97 | 23,0 | 7,91 | -0,02 | 0,00 | |
| 300 | 8,96 | 23,1 | 7,91 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 330 | 8,94 | 23,2 | 7,91 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 360 | 8,93 | 23,2 | 7,91 | -0,01 | 0,00 | |
| 390 | 8,91 | 23,2 | 7,91 | -0,02 | 0,00 | |
| 420 | 8,90 | 23,3 | 7,91 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 450 | 8,91 | 23,4 | 7,91 | 0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 480 | 8,89 | 23,5 | 7,91 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 510 | 8,86 | 23,6 | 7,91 | -0,03 | 0,10 | 0,300 |
| 540 | 8,84 | 23,8 | 7,91 | -0,02 | 0,20 | 0,100 |
| 570 | 8,83 | 23,9 | 7,93 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 600 | 8,83 | 24,0 | 7,93 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 630 | 8,80 | 24,1 | 7,93 | -0,03 | 0,10 | 0,300 |
| 660 | 8,79 | 24,2 | 7,93 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 690 | 8,78 | 24,3 | 7,93 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 720 | 8,77 | 24,4 | 7,93 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 750 | 8,75 | 24,5 | 7,93 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 780 | 8,74 | 24,7 | 7,93 | -0,01 | 0,20 | 0,050 |
| 810 | 8,69 | 24,8 | 7,93 | -0,05 | 0,10 | 0,500 |
| 840 | 8,67 | 24,9 | 7,93 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 870 | 8,69 | 25,0 | 7,93 | 0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 900 | 8,67 | 25,1 | 7,93 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 930 | 8,65 | 25,2 | 7,93 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 960 | 8,63 | 25,3 | 7,93 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 990 | 8,63 | 25,4 | 7,93 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 1020 | 8,58 | 25,5 | 7,93 | -0,05 | 0,10 | 0,500 |
| 1050 | 8,58 | 25,6 | 7,93 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 1080 | 8,59 | 25,7 | 7,93 | 0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 1110 | 8,55 | 25,7 | 7,95 | -0,04 | 0,00 | |
| 1140 | 8,55 | 25,8 | 7,95 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 1170 | 8,53 | 25,9 | 7,95 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 1200 | 8,52 | 26,0 | 7,95 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 1230 | 8,49 | 26,1 | 7,95 | -0,03 | 0,10 | 0,300 |
| 1260 | 8,48 | 26,2 | 7,95 | -0,01 | 0,10 | 0,100 |
| 1290 | 8,46 | 26,3 | 7,95 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 1320 | 8,46 | 26,3 | 7,95 | 0,00 | 0,00 | |
| 1350 | 8,44 | 26,4 | 7,95 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 1380 | 8,42 | 26,5 | 7,95 | -0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 1410 | 8,38 | 26,6 | 7,95 | -0,04 | 0,10 | 0,400 |
| 1440 | 8,39 | 26,6 | 7,95 | 0,01 | 0,00 | |
| 1470 | 8,35 | 26,7 | 7,95 | -0,04 | 0,10 | 0,400 |
| 1500 | 8,35 | 26,8 | 7,95 | 0,00 | 0,10 | 0,000 |
| 1530 | 8,37 | 26,9 | 7,97 | 0,02 | 0,10 | 0,200 |
| 1560 | 8,31 | 26,9 | 7,97 | -0,06 | 0,00 | |

| | [O ₂] dissous moyenne | Température moyenne de l'eau | pH moyen | ΔO ₂ moyen | ΔTmoyen | Pente moyenne |
|------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------------------|---------|------------------|
| | (mg/L) | (°C) | | | | |
| | 8,72 | 24,65 | 7,93 | -0,01 | 0,08 | 0,16 |
| Écart-type | 0,23 | 1,42 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,13 |

| Estimation de la dérivée $\Delta O_2/\Delta T$ en (mg/(L*°C)) à partir de la droite de régression: | | | | | | |
|--|--------|--|--|--|--|--|
| | | | | | | |
| | 0,1608 | | | | | |

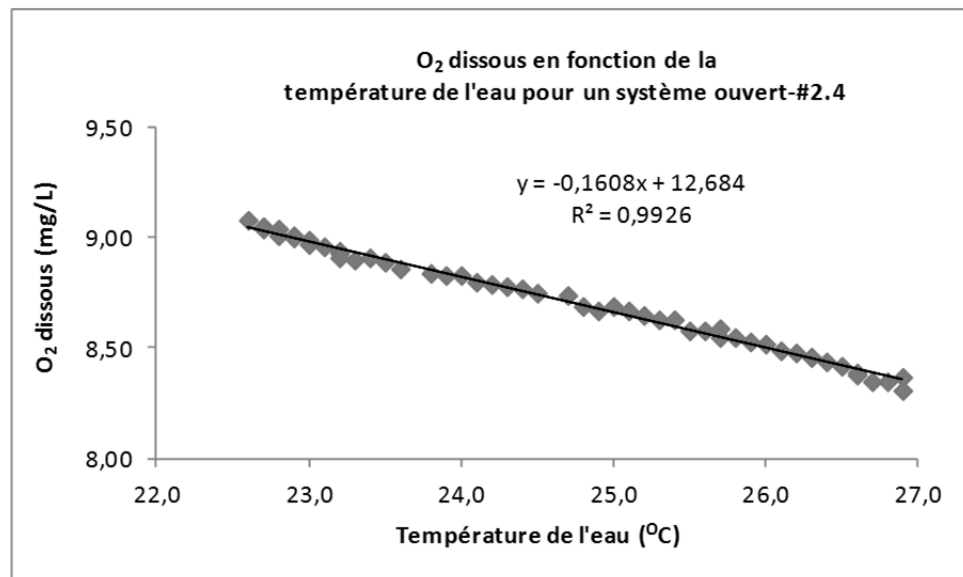


Figure-A V-1 Régression linéaire des données recueillis pour le 4^e des essais de la 2^e série

ANNEXE VI

PROTOCOLE TYPIQUE D'UNE JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION

I. Préparation du pilote

Tout d'abord, un des réservoirs est rempli avec l'eau potable de la ville de Montréal en respectant une combinaison établie d'eau chaude et d'eau froide afin d'obtenir une température de départ autour de 23°C voisinant celle de la pièce. Le plus souvent, l'eau d'essai est préparée la veille à la fin d'une journée d'expérimentation après avoir purgé sans exagération les réservoirs et le pilote par rinçage. Pour traiter le même volume d'eau à chaque expérience, une marque a été identifiée sur chacun des réservoirs. Le volume choisi tourne autour de 300 L et offre une durée d'essai raisonnable pour les diverses mesures et manipulations à réaliser. Le choix du réservoir n'est pas toujours arbitraire en raison d'une asymétrie de ces derniers. Dans certaine expérience, le transfert d'un réservoir vers l'autre s'avère plus stable au niveau de l'équilibre des sondes de mesures. Le réservoir initialement rempli est si possible choisi de sorte que le sens du transfert le plus stable tombe sur la mesure du temps de résidence. La raison est qu'un coup d'eau déséquilibrant les sondes nécessite un temps d'ajustement qui retarde l'injection de la solution du traceur. En fonction du temps de résidence (t_R) de la configuration du pilote testée, il se peut que le temps restant de l'essai ne soit plus suffisant pour offrir la possibilité d'une élimination complète du traceur. C'est un paramètre à considérer dans la réussite de cette catégorie d'essai.

Les différents appareils sont mis en marche et calibrés si nécessaire. C'est d'abord le cas de la caméra à capture rapide qui est fixé sur son trépied, connectée aux projecteurs DELs et branchée à l'ordinateur. Cette dernière est calibrée et il est vérifié que la qualité d'image est la bonne et que le cadre n'a pas bougé. Les changements de date et de nom des fichiers films de la caméra sont faits dans le logiciel en fonction de l'expérience en cours. La boîte de contrôle utilisée pour fermer et ouvrir rapidement les différents projecteurs et les ventilateurs est vérifiée. L'interrupteur associé aux projecteurs Dels demeure quant à lui ouvert durant

toute la durée de l'expérience alors que c'est la caméra qui contrôle leur fonctionnement. Ensuite, la plaque agitatrice est allumée et la vitesse de rotation ajustée à 300 tours minute. Les différentes sondes sont conditionnées de sorte d'assurer leur bon fonctionnement et la stabilité de leurs mesures. Dans le cas de l'oxygénomètre, la calibration respecte le guide de l'appareil et est réalisée en pourcentage de l'oxygène mesuré suivant les conditions de laboratoire. La fonction de l'appareil utilisée à cette fin est activée (fonction «O2D Local%»). Ensuite la touche servant à la calibration est activée («Cal»). Le milieu considéré avec 100% d'humidité est une bouteille de DBO dans lequel 5 cm d'eau distillée est ajoutée, fermée hermétiquement et laissée à température pièce jusqu'à ce que la mesure de calibration soit réalisée. Noter que cette même bouteille sert à l'entreposage adéquat de la sonde lorsqu'elle n'est pas utilisée afin de protéger sa membrane. Il n'y a pas de compensation faite pour la salinité qui est fixée à 0,0 ppm. Pour ce qui est du baromètre de l'appareil, les paramètres d'usine sont conservés et la mesure est comparée aux valeurs de météo locale pour s'assurer de la cohérence. Les valeurs mesurées du taux d'oxygène en mg/L, de la température en °C et de la pression atmosphérique en kPa par rapport au milieu 100% humide sont notées dans le cahier de laboratoire. Immédiatement après un échantillon d'eau d'essai servant de référence est préservé dans une bouteille de DBO contenant un barreau magnétique et est placé sur la plaque agitatrice pour être testé à l'aide de la sonde calibrée de l'oxygénomètre. Les mesures de taux, de pression et de température sont aussi notées dans le cahier. À la fin de la journée d'expérimentation, la procédure sera reprise à la fois pour le milieu 100% humide et l'échantillon d'eau de référence afin d'être comparées à celles du début pour s'assurer de la stabilité des sondes de mesure et de la fiabilité des données recueillies. C'est ensuite l'électrode de verre utilisée pour la mesure du pH qui est calibrée suivant les instructions usuelles à l'aide des étalons standards prévus à cette fin. Il n'y a pas de vérification nécessaire à la fin de la journée d'expérimentation. Dans le cas de la sonde à conductivité, pour répondre au point de calibration de la plage 0 à 1999 μS , une solution mère de 1 litre de KCl a été préparée en pesant exactement $0,7460 \pm 0,0001$ g donnant une concentration visée de $0,01001 \pm 0,00001$ M. À chaque début d'expérience, la conductivité et la température d'un petit volume de la solution mère sont mesurées à l'aide de la sonde. Ce petit volume est remplacé après chaque bloc de répétitions d'une expérience ou suivant le

besoin observé. La valeur attendue doit demeurer dans l'intervalle de $1415 \pm 15 \mu\text{S}$ à $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ et elle est notée dans le cahier de laboratoire. Il est suffisant de vérifier la stabilité de cette sonde seulement au début de la journée d'expérimentation. Dès lors, les sondes sont prêtes à l'utilisation et sont positionnées dans leur cylindre respectif sauf l'électrode de verre qui est entreposée dans l'eau distillée dans l'attente de son utilisation.

La mesure du taux d'oxygène demeure le signal principal et la sonde est toujours utilisée. Cependant, le pH et la conductivité se partagent les essais. Dans un premier temps, la conductivité est le signal secondaire mesuré en continu lors des deux premières catégories d'essai réalisées; soit la mesure du blanc et la mesure du temps de résidence. Pour mesurer le pH de l'eau initiale avant de démarrer l'essai de la mesure du blanc, quatre aliquotes sont échantillonnées; deux en surface du réservoir et deux à la base du réservoir. Des bouteilles de DBO sont utilisées pour recueillir l'eau. La lecture du pH de ces quatre aliquotes peut être faite soit immédiatement, soit lors du changement de sondes au moment de la mise en place de l'essai de la mesure du zéro. Le pH deviendra à ce moment le signal secondaire suivi en continu jusqu'à la toute fin de l'expérience et la conductivité de l'eau désoxygénée sera mesurée par une étape d'échantillonnage similaire. Par précaution ou pour information au besoin, ces huit échantillons d'eau recueillies suivant leur identification seront conservées jusqu'à la toute fin de l'expérience. Par la suite, lorsque toutes les informations seront recueillies, les bouteilles seront vidées et rincées de la même manière que les réservoirs et en disposant de l'eau à travers le système de renvoi municipal. Attention ici, une eau contaminée pourrait nécessiter des mesures de sécurité et de disposition différentes. Noter que les essais de réoxygénation ne modifient pas la conductivité mesurée dans l'eau désoxygénée. Il est inutile de reprendre cette mesure durant cette partie de l'expérience car la conductivité demeure la même à la précision de la lecture près.

Maintenant avant de lancer le premier essai, il est vérifié que l'eau circulera à travers le bon réseau de tuyaux en mode circuit ouvert; du réservoir plein vers celui qui est vide. Les bonnes valves associées sont ouvertes ou fermées selon le cas. Le circuit d'eau utilisé dans toutes les expériences passe par les deux sorties d'eau de la colonne pour être ramené à

l'intersection menant à l'un des deux réservoirs. Il faut également positionner le tuyau flexible du retour de l'eau passant par les sondes dans le bon réservoir d'arrivée. Pour le gaz à injecter, le circuit menant au bon débitmètre doit être utilisé. Il est vérifié que la pression du manomètre à l'entrée du gaz sur le déhuileur est bien restreinte et jaugée à $1,00 \pm 0,05$ bar. La valve principale d'entrée du gaz dans le pilote est ensuite ouverte. Vérifier que le débit affiché sur le débitmètre pour le gaz s'ajuste à la valeur attendue avant le démarrage de la pompe. Cette marque de référence est établie lors des tests préliminaires pour s'assurer d'obtenir le bon ratio G/L pour l'expérience visée. La caméra numérique pour filmer les données en continu est préparée pour l'essai. Cette dernière est positionnée sur son trépied de sorte de bien cadrer les cadrans des appareils de mesure. Le chronomètre pour la mesure du temps de l'expérience est à portée de main. Le logiciel de la caméra haute vitesse est prêt à être utilisé. Le cahier de laboratoire est ouvert pour la prise de mesure. La fonction du débitmètre électronique donnant le total du volume d'eau ayant circulé par ce dernier lors d'un essai est remise à zéro. L'essai peut alors débiter.

II. Mesure du blanc (procédure de base)

Tout d'abord, bien identifier dans le cahier de laboratoire la catégorie de l'essai, le nom du fichier film, et le sens du transfert d'un réservoir à l'autre (R1 vers R2 ou R2 vers R1). Lire la température du gaz sur le thermomètre prévu à cette fin et la pression atmosphérique sur l'afficheur de l'oxygéno-mètre. Noter ces valeurs. Au moment d'activer la pompe démarrer simultanément le chronomètre. Le démarrage ou l'arrêt de la pompe est ramené à un interrupteur d'une boîte de contrôle pour en simplifier l'opération. Surveiller le débit d'eau affiché et noter le temps nécessaire pour que la pompe atteigne son régime permanent (TRP); soit le temps écoulé entre le démarrage de la pompe et l'atteinte du débit d'eau visé pour obtenir le bon ratio G/L de l'expérience. Ce temps est noté dans le cahier de laboratoire. Il définit en quelque sorte l'accélération de la pompe pour atteindre sa vitesse de croisière. Ensuite, le niveau d'eau dans la colonne de contact secondaire augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum pour redescendre un peu et se stabiliser à une hauteur d'équilibre. Ce phénomène est suivi car il donne de l'information potentiellement utilisable

sur l'accumulation du gaz dans le haut de la colonne. Le zéro d'une règle de 15 cm est collé sur la paroi à $88,8 \pm 0,2$ cm de sa base. Le moment ainsi que la hauteur atteinte par le ménisque d'eau sur la règle sont notés suivant le temps écoulé. Une surveillance attentive du débit de gaz est maintenue tout au long de l'essai. Ce dernier est ajusté au besoin afin de le maintenir à sa valeur prévue. Un minimum de trois lectures doit être effectué, mais plus si possible et à intervalle régulier. Toujours prendre une lecture du débit sur l'échelle du débitmètre avant de l'ajuster. La même procédure de surveillance et de prise de lectures est appliquée pour le débit d'eau. Cependant, s'il n'y a pas de restriction sur ce dernier à l'aide de la valve; il ne peut pas être ajusté au cours de l'essai. Seules des lectures sont prises. Lorsque l'eau atteint les cylindres contenant les sondes de mesure, l'opérateur se dirige rapidement vers elles pour éviter tout débordement et corriger si nécessaire la position des cylindres. Une fois l'équilibre des sondes et de leurs mesures obtenues, l'opérateur se dirige vers la caméra numérique pour débiter le film de surveillance en continu de l'essai. Le film est démarré et ce moment est noté dans le cahier de laboratoire suivant le temps écoulé sur le chronomètre. Par la suite, tout en gardant un œil sur les sondes de mesure, un minimum de trois lectures de pressions est fait à intervalle régulier sur chacun des différents manomètres présents sur le pilote. Ils sont bien identifiés par leur lettre respective dans le cahier de laboratoire. Également à titre de référence et de précaution en cas de perte de données, le taux d'oxygène en mg/L, la température en °C, la conductivité en μS sont notés suivant le moment où ces mesures sont prises par rapport au temps écoulé (le pH remplace la conductivité suivant l'essai réalisé). Ensuite, à mi-chemin de l'essai, la réalisation des deux films de la caméra haute-vitesse sont intégrés aux diverses manipulations. Tout d'abord, comme il a été mentionné, avant de démarrer l'essai, la caméra et le logiciel sont configurés suivant un plan photo donné. Il faut simplement s'assurer que la configuration interne de la caméra réactivée en mémoire et la position de l'obturateur de la lentille se coordonnent. Entre 2.8 et 4.0 si c'est le type «Taille de bulle» et à exactement 2.0 si c'est le type «Panache de bulle». Avant de réaliser l'acquisition du premier film, la plupart du temps la caméra est en position active de sorte que les images défilent en temps réel. Par l'intermédiaire de la boîte de contrôle, les projecteurs de 600 Watts sont allumés et les ventilateurs activés. L'enregistrement commence en appuyant sur la fonction «record» de la caméra. Dès que

l'acquisition des photos est complétée, les projecteurs sont fermés. Rapidement les données du film sont transférées et sauvegardées pour procéder à l'acquisition suivante. L'autre configuration interne de la caméra est ainsi réactivée en mémoire. Dès lors l'obturateur de l'objectif est repositionné suivant la configuration activée. Les images de la caméra sont regardées en temps réel pour s'assurer du bon plan photo et de la qualité de l'image. Dès lors il est possible de procéder à l'acquisition du deuxième film suivant la même procédure que précédemment. Cette fois, il est possible d'attendre à la fin de l'essai avant de sauvegarder l'acquisition. En effet, les données sont conservées dans la mémoire interne de la caméra à moins d'une nouvelle action entreprise. La dite fin de l'essai se produit lorsque le débit chute d'environ la moitié de sa valeur, que le réservoir est pratiquement vidé et que l'eau se retire du cylindre des sondes. La pompe est d'abord arrêtée en même temps que le chronomètre. Le même sort s'applique rapidement en ce qui a trait à l'enregistrement de la caméra numérique standard. Le temps écoulé de l'expérience (TE) est notée ainsi que le volume d'eau total ayant traversé la pompe (ToEP); valeur donnée par le débitmètre. L'eau restante dans la colonne de contact secondaire est ensuite vidangée vers le réservoir nouvellement rempli. Les différentes valves d'eau sont ouvertes et fermées en conséquence de cette opération. Le circuit d'eau prévu à cette fin est un tuyau flexible placé dans le bon réservoir au tout début de l'essai pour éviter toute erreur. La pompe est de nouveau activée à l'aide de l'interrupteur et la colonne est vidée. Toutes les valves sont ensuite rétablies et le circuit de transfert d'eau d'un réservoir à l'autre est inversé pour préparer le prochain essai. Voici un exemple de données recueillies lors de ce type d'essai et du formulaire développé pour les colliger.

Tableau-A VI-1 Exemple de formulaire rempli pour un essai de type mesure du blanc dans le cadre de l'expérience #6 en mode jet libre

| CARACTERISTIQUES GENERIQUES | | | | | | |
|---|--|----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|
| Note: Les zones ombragées sont celles nécessitant l'ajout de valeurs et les valeurs soulignées des liens hypertextes. | | | | | | |
| NOM DE L'EXPERIENCE | Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | | | | | |
| No DE L'EXPERIENCE | 6 | | | | | |
| No DE LA SERIE D'ESSAIS | 1 | | | | | |
| CATEGORIE DE L'ESSAI | Mesure du Blanc | | | | | |
| No REPETITION DE L'ESSAI | 1 | | | | | |
| DATE | 2011-12-12 | | | | | |
| No CAHIER LABORATOIRE | 4 | | pages | | 1-2 | |
| CONFIGURATION PILOTE | Mode jet libre | | | | | |
| DESCRIPTION SOMMAIRE | L'expérience se place dans le contexte de construction d'une base de référence pour le pilote pour fin de comparaison. Le mode jet libre est utilisé pour ce faire en raison de sa simplicité. Cependant, l'essai actuel cherche à établir la performance de réoxygénation lorsque que le ratio du débit de gaz sur celui de l'eau gravite autour de 0,08 alors que l'eau est initialement déjà saturée en oxygène. Quel est l'effet de cet ajout d'air. Comme les valeurs de débits permettant d'atteindre ce ratio peuvent varier, l'essai se place dans le contexte où il n'y a aucune restriction sur le débit d'eau de la pompe et le débit d'air est ajusté en conséquence. Cet essai fixe la quantité initiale en oxygène présente dans l'eau | | | | | |
| MODE TRANSFERT DE L'EAL | circuit ouvert | | SENS DU TRANSFERT | R1 vers R2 | | |
| DÉBIT DE GAZ VISÉ | | | | | | |
| | Type de gaz | Débit-mètre | Débit gaz ciblé sur l'échelle | | Débit gaz ciblé corrigé | |
| | air comprimé | Fo | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | | mm | | mL/s |
| | | | 30,0 | 0,2 | 18,4 | 6,0 |
| | | | | | | mL/min |
| | | | | | 1104,0 | 360,0 |
| | | | | | | L/min |
| | | | | | 1,104 | 0,360 |
| DÉBIT D'EAU VISÉ | | | | | | |
| | Eau d'essai | Débit-mètre | Débit eau ciblé à l'affichage | | Débit eau ciblé corrigé | |
| | potable | électronique | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | L/min | L/min | L/min | L/min |
| | | | 10,7 | 0,1 | 13,7 | 0,4 |
| RATIO G/L VISÉ | Théorique calculé | | | Chiffres significatifs ajustés | | |
| (DÉBIT GAZ/DÉBIT EAU) | valeur | incertitude(±) | | valeur | incertitude(±) | |
| (L/min/L/min) | 0,08053 | 0,02636 | | 8,1E-02 | 3E-02 | |
| ÉTALONNAGE DES SONDES ET STABILITÉ POUR LA JOURNÉE D'EXPERIMENTATION | | | | | | |
| PARAMETRES | SONDES | | | | | |
| | O2 dissous | | | | pH | |
| | Milieu 100% humide | | Eau de référence à T° pièce | | Étalonnage réussi | |
| | Début | Fin | Début | Fin | | |
| [O2] (mg/L) | 8,83 | 8,60 | 10,02 | 9,88 | Conductivité | |
| [O2] (%) | 100,0 | 99,0 | 112,0 | 113,1 | Étalon de KCl 0,01 M | |
| Patm (kPa) | 102,7 | 102,5 | 102,7 | 102,5 | Début | Fin |
| T° (°C) | 22,2 | 22,9 | 21,5 | 22,7 | 22,2 | |
| (µS) | | | | | 1420 | |

| SOLUTIONS D'INJECTION | | | | | | |
|---|---------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| | Date de préparation | Volume préparé (±0,5mL) | Volume injecté (±0,5 mL) | Masse pesée (±0,0001g) | [massique] (g/mL) | incertitude (± g/mL) |
| Na ₂ SO ₃ (sulfites de sodium) | | 50,0 | 10,0 | | 0,000 | #DIV/0! |
| PRÉPARATION POUR LA DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| MASSE PESÉE DE Na₂SO₃ (±0,0001g) | | | | | | |
| RÉSERVOIR SERVANT À DÉSOXYGÉNER | | | | | R1 | |
| TEMPS D'ATTENTE AVANT UTILISATION DE L'EAU | | | | | ≥15 minutes | |
| FICHER FILM CONTENANT LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES D'INTÉRÊT DE CET ESSAI | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| 1. 2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Blanc.MOV | | | | | | |
| FICHIERS IMAGES DE LA CAMÉRA HAUTE-VITESSE ASSOCIÉ À CET ESSAI | | | | | | |
| SECTION PHOTOS DE RÉFÉRENCE POUR CORRECTION D'IMAGE (SI NÉCESSAIRE) | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Panache2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Taille2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| SECTION DOSSIER CONTENANT LES PHOTOS ASSOCIÉES À CET ESSAI | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Panache2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Blanc_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 2 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Taille2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Blanc_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 13 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |

| DONNÉES EXPÉRIMENTALES | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------------|----------------------|----------|
| | | Lecture | Incertitude (±) | | |
| PRESSION ATMOSPHERIQUE (kPa) | | 102,6 | 0,3 | | |
| TEMPÉRATURE DU GAZ (°C) | | 22,0 | 0,1 | | |
| | | Format lecture | | Exprimé seulement en | |
| | | heure | min | s | |
| TEMPS TOTAL DE L'ESSAI (TTE) | | 18 | 42 | 18,70 | 1122 |
| TEMPS ÉCOULÉ POUR RÉGIME PERMANENT | | | 34 | 0,57 | 34 |
| DURÉE TOTALE DU FILM | | 13 | 35 | 13,58 | 815 |
| TEMPS ÉCOULÉ NOTÉ AVANT DÉBUT DU FILM | | 5 | 10 | 5,17 | 310 |
| MOMENT DE FIN DE L'ESSAI SUR LE FILM | | 13 | 32 | 13,53 | 812 |
| TEMPS « RÉEL » AVANT LE DÉBUT DU FILM | | 5 | 10 | 5,17 | 310 |
| <i>(Ne s'applique pas à cet essai)</i> | | | | | |
| HEURE FILMÉE DE L'INJECTION DU TRACEUR | | | | inutile | inutile |
| MOMENT DE L'INJECTION SUR LE FILM | | | | | |
| TEMPS « RÉEL » ÉCOULÉ AVANT L'INJECTION | | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! |
| SECTION DÉBITS MESURÉS ET RATIO G/L EXPÉRIMENTAL | | | | | |
| VOLUME TOTAL D'EAU TRAITÉ | | Lu | Corrigé | | |
| | Unités | L | L | | |
| | | 199,8 | 259,5 | | |
| | Incertitude(±) | 0,1 | 0,4 | | |
| DÉBIT D'EAU MOYEN CALCULÉ | | Non corrigé | Corrigé | | |
| | unités | L/min | L/min | | |
| | | 10,68 | 13,88 | | |
| | incertitude(±) | 0,01 | 0,03 | | |

ÉVALUATION DE LA HAUTEUR DE LA COLONNE D'EAU (CONTACT SECONDAIRE) AU COURS DE L'ESS

| | Compteur (i) | Valeur mesurée ($\pm 0,2$ cm) | Lecture du temps écoulé | | Temps écoulé en s ($\pm 1s$) |
|---|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|------|--------------------------------------|
| | | | min | s | |
| | | | 1 | 8,00 | |
| 2 | 5,00 | 5 | 38 | 338 | |
| 3 | 4,90 | | | | |

DÉBIT DE GAZ EXPÉRIMENTAL

| | Unités Incertitude(\pm) | Débits mesurés | | Débits corrigés | |
|----------|--------------------------------|----------------|-------|-----------------|--------|
| | | mm | mL/s | mL/min | L/min |
| | | 0,2 | 6,0 | 360,0 | 0,360 |
| Compteur | 1 | 30,00 | 18,40 | 1104,0 | 1,1040 |
| | 2 | 25,00 | 15,00 | 900,0 | 0,9000 |
| | 3 | 29,00 | 17,72 | 1063,2 | 1,0632 |
| | 4 | 30,00 | 18,40 | 1104,0 | 1,1040 |
| | 5 | 30,00 | 18,40 | 1104,0 | 1,1040 |
| | 6 | 30,10 | 18,47 | 1108,1 | 1,1081 |
| | Moyenne | 29,02 | 17,73 | 1063,9 | 1,0639 |
| | Écart-type | 2,01 | 1,37 | 82,0 | 0,0820 |

| DONNÉES DE PRESSION CORRIGÉES | | | | | | |
|--|------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Manomètres | A | A.1 | B | C | D | F |
| Force | Ligne d'eau | Ligne d'eau | Gaz cumulé | ligne d'eau | ligne d'eau | ligne de gaz |
| Position | Entrée injecteur | sortie injecteur | colonne de contact secondaire | sortie du haut vers les réservoirs | sortie du bas vers les réservoirs | entrée injecteur |
| Unités | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) |
| | 301,98 | 46,54 | 32,75 | 17,64 | 44,40 | -51,02 |
| | 300,42 | 46,54 | 33,26 | 18,14 | 44,04 | -53,07 |
| | 299,37 | 46,04 | 32,75 | 17,64 | 44,04 | -47,96 |
| | 298,33 | 46,04 | 33,26 | 18,04 | 44,04 | -48,98 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Moyenne | 300 | 46,3 | 33,0 | 17,9 | 44,1 | -50 |
| Écart-type | 2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 2 |
| SECTION ÉCHANTILLONAGE DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| MESURE DU pH DE L'EAU D'ESSAI INITIALE À TEMPÉRATURE PIÈCE | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | pH | | pH | | | |
| #1 | 7,82 | | 7,81 | | pH moyen | 7,82 |
| #2 | 7,81 | | 7,83 | | Écart-type | 0,01 |
| MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ (ϕ) FINALE ASSOCIÉE À L'EAU D'ESSAI DÉSOXYGÉNÉE | | | | | | |
| Note: Ces valeurs sont les mêmes pour chaque type d'essai d'une même répétition d'une expérience | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | | |
| #1 | 418 | 22,7 | 417 | 22,7 | ϕ moyenne | 418 |
| #2 | 417 | 22,7 | 418 | 22,6 | Écart-type | 1 |
| | | | | | T moy ($^{\circ}$ C) | 22,7 |
| | | | | | Écart-type | 0,0 |
| SECTION OXYGÈNE DISSOUS, TEMPÉRATURE, pH ET CONDUCTIVITÉ MESURÉS (tiré du fichier) | | | | | | |
| Compteur | Temps écoulé de l'expérience | Temps écoulé du film | [O ₂] dissous | Température de l'eau | Conductivité | Annotations |
| | ($\pm 0,02$ min) | (± 1 s) | ($\pm 0,2$ mg/L) | ($\pm 0,3$ $^{\circ}$ C) | (± 21 μ S) | |
| 1 | 5,17 | 0 | 9,42 | 21,9 | 304 | |
| 1 | 5,33 | 10 | 9,45 | 22,0 | 304 | |
| 1 | 5,50 | 20 | 9,48 | 22,0 | 304 | |
| 1 | 5,67 | 30 | 9,50 | 22,0 | 304 | |
| 1 | 5,83 | 40 | 9,50 | 22,0 | 304 | |
| 1 | 6,00 | 50 | 9,54 | 22,0 | 304 | Ajustement |
| 1 | 6,17 | 60 | 9,56 | 22,0 | 304 | |
| 1 | 6,33 | 70 | 9,58 | 22,0 | 304 | Ajustement |
| 1 | 6,50 | 80 | 9,60 | 22,0 | 304 | Ajustement |

| | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|----------------|
| 1 | 6,67 | 90 | 9,60 | 22,0 | 304 Ajustement |
| 1 | 6,83 | 100 | 9,62 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,00 | 110 | 9,63 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,17 | 120 | 9,64 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,33 | 130 | 9,63 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,50 | 140 | 9,64 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,67 | 150 | 9,66 | 22,0 | 304 |
| 1 | 7,83 | 160 | 9,68 | 22,0 | 304 |
| 1 | 8,00 | 170 | 9,66 | 22,0 | 304 |
| 1 | 8,17 | 180 | 9,67 | 22,0 | 304 |
| 1 | 8,33 | 190 | 9,66 | 22,0 | 304 |
| 1 | 8,50 | 200 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 8,67 | 210 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 8,83 | 220 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,00 | 230 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,17 | 240 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,33 | 250 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,50 | 260 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,67 | 270 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 9,83 | 280 | 9,65 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,00 | 290 | 9,65 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,17 | 300 | 9,65 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,33 | 310 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,50 | 320 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,67 | 330 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 10,83 | 340 | 9,64 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,00 | 350 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,17 | 360 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,33 | 370 | 9,63 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,50 | 380 | 9,63 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,67 | 390 | 9,64 | 22,1 | 304 |
| 1 | 11,83 | 400 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,00 | 410 | 9,63 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,17 | 420 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,33 | 430 | 9,65 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,50 | 440 | 9,64 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,67 | 450 | 9,60 | 22,1 | 304 |
| 1 | 12,83 | 460 | 9,63 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,00 | 470 | 9,61 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,17 | 480 | 9,61 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,33 | 490 | 9,59 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,50 | 500 | 9,62 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,67 | 510 | 9,63 | 22,1 | 304 |
| 1 | 13,83 | 520 | 9,61 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,00 | 530 | 9,62 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,17 | 540 | 9,61 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,33 | 550 | 9,61 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,50 | 560 | 9,62 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,67 | 570 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 14,83 | 580 | 9,67 | 22,1 | 304 |

| | | | | | |
|---|-------|------|------|------|-------------|
| 1 | 15,00 | 590 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 15,17 | 600 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 15,33 | 610 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 15,50 | 620 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 15,67 | 630 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 15,83 | 640 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,00 | 650 | 9,69 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,17 | 660 | 9,69 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,33 | 670 | 9,67 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,50 | 680 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,67 | 690 | 9,69 | 22,1 | 304 |
| 1 | 16,83 | 700 | 9,68 | 22,1 | 304 |
| 1 | 17,00 | 710 | 9,69 | 22,1 | 304 |
| 1 | 17,17 | 720 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 17,33 | 730 | 9,66 | 22,1 | 304 |
| 1 | 17,50 | 740 | 9,65 | 22,1 | 304 |
| 1 | 17,67 | 750 | 9,67 | 22,1 | 301 |
| 1 | 17,83 | 760 | 9,66 | 22,1 | 301 |
| 1 | 18,00 | 770 | 9,66 | 22,1 | 301 |
| 1 | 18,17 | 780 | 9,64 | 22,1 | 301 |
| 1 | 18,33 | 790 | 9,61 | 22,1 | 301 |
| 1 | 18,50 | 800 | 9,61 | 22,1 | 301 |
| | 18,67 | 810 | | | non valide |
| | 18,83 | 820 | | | Arrêt essai |
| | 19,00 | 830 | | | |
| | 19,17 | 840 | | | |
| | 19,33 | 850 | | | |
| | 19,50 | 860 | | | |
| | 19,67 | 870 | | | |
| | 19,83 | 880 | | | |
| | 20,00 | 890 | | | |
| | 20,17 | 900 | | | |
| | 20,33 | 910 | | | |
| | 20,50 | 920 | | | |
| | 20,67 | 930 | | | |
| | 20,83 | 940 | | | |
| | 21,00 | 950 | | | |
| | 21,17 | 960 | | | |
| | 21,33 | 970 | | | |
| | 21,50 | 980 | | | |
| | 21,67 | 990 | | | |
| | 21,83 | 1000 | | | |
| | 22,00 | 1010 | | | |
| | 22,17 | 1020 | | | |
| | 22,33 | 1030 | | | |
| | 22,50 | 1040 | | | |
| | 22,67 | 1050 | | | |
| | 22,83 | 1060 | | | |
| | 23,00 | 1070 | | | |
| | 23,17 | 1080 | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| | 23,33 | 1090 | | | |
| | 23,50 | 1100 | | | |
| | 23,67 | 1110 | | | |
| | 23,83 | 1120 | | | |
| | 24,00 | 1130 | | | |
| | 24,17 | 1140 | | | |
| | 24,33 | 1150 | | | |
| | 24,50 | 1160 | | | |
| | 24,67 | 1170 | | | |
| | 24,83 | 1180 | | | |
| | 25,00 | 1190 | | | |
| | 25,17 | 1200 | | | |
| | 25,33 | 1210 | | | |
| | 25,50 | 1220 | | | |
| | 25,67 | 1230 | | | |
| | 25,83 | 1240 | | | |
| | 26,00 | 1250 | | | |
| | 26,17 | 1260 | | | |
| | 26,33 | 1270 | | | |
| | 26,50 | 1280 | | | |
| | 26,67 | 1290 | | | |
| | 26,83 | 1300 | | | |
| | 27,00 | 1310 | | | |
| | 27,17 | 1320 | | | |
| | 27,33 | 1330 | | | |
| | 27,50 | 1340 | | | |
| | 27,67 | 1350 | | | |
| | 27,83 | 1360 | | | |
| | 28,00 | 1370 | | | |
| | 28,17 | 1380 | | | |
| | 28,33 | 1390 | | | |
| | 28,50 | 1400 | | | |
| | 28,67 | 1410 | | | |
| | 28,83 | 1420 | | | |
| | 29,00 | 1430 | | | |
| | 29,17 | 1440 | | | |
| | 29,33 | 1450 | | | |
| | 29,50 | 1460 | | | |
| | 29,67 | 1470 | | | |
| | 29,83 | 1480 | | | |
| | 30,00 | 1490 | | | |
| | 30,17 | 1500 | | | |
| Nombre total de données | | | [O2] dissous moyenne | Température moyenne de l'eau | Conductivité moyenne |
| 81 | | | (mg/L) | (°C) | (uS) |
| | | | 9,64 | 22,07 | 303,8 |
| | Écart-type | | 0,05 | 0,05 | 0,8 |

| SECTION COMMENTAIRES OU OBSERVATIONS LORS DE L'ESSAI | | | | | |
|---|--------|---------|--------|--------|--------|
| Note : L'eau de référence pour le contrôle de la sonde à oxygène était la même que celle utilisée au départ pour réaliser le blanc, bref elle a été puisée dans le réservoir initiale R2 pour fin d'information supplémentaire. | | | | | |
| Pour le traitement des photos CAM-HV, la hauteur du panache est considérée comme égale à celle mesurée précédemment dans les 5 premières expériences qui consiste en gros à la hauteur entre le bout du tuyau et la base de la colonne où les bulles disparaissent vers le fond de la | | | | | |
| SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA TAILLE MOYENNE DES BULLES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA HAUTEUR ET DE LA LARGEUR MOYENNE DU PANACHE DE BULLES | | | | | |
| DESCRIPTION QUALITATIVE DE LA DISTRIBUTION ET DE LA FORME DES BULLES | | | | | |
| Fichier des images traitées avec DraftSight: | | | | | |
| 1. Lien imalog 2. Sauvegarde | | | | | |
| Photos traitées CAM-HV\LesBlancs\Exp#6 blanc 1 2 001.dwg | | | | | |
| Dimensions de référence dans les photos (valeur de correction en mm): | | | | | |
| | | | | RP | 5,0 |
| | | | | RT | 5,0 |
| Photos traitées | | | | | |
| Configuration Panache de bulles Configuration Taille de bulles | | | | | |
| Paramètres | RP | H | L | RT | T |
| Valeur estimée à l'aide du logiciel (unité logiciel) | 0,2822 | | 2,1059 | 0,7034 | 0,1536 |
| | 0,2906 | | 2,0894 | 0,7286 | 0,7377 |
| | 0,2906 | | 1,9280 | 0,7329 | 0,4476 |
| | | | | | 0,7240 |
| | | | | | 0,8000 |
| | | | | | 0,4946 |
| | | | | | 0,4876 |
| | | | | 0,4674 | |
| Moyenne | 0,288 | #DIV/0! | 2,041 | 0,722 | 0,539 |
| Écart-type | 0,005 | #DIV/0! | 0,098 | 0,016 | 0,210 |
| Valeur réelle estimée (en mm) | | H | L | | T |
| | | | 36,586 | | 1,064 |
| | | | 36,300 | | 5,111 |
| | | | 33,495 | | 3,101 |
| | | | | | 5,016 |
| | | | | | 5,543 |
| | | | | | 3,427 |
| | | | | 3,378 | |
| | | | | 3,238 | |
| Moyenne | | #DIV/0! | 35 | | 4 |
| Écart-type | | #DIV/0! | 2 | | 1 |

| Description qualitative des caractéristiques associées à la répartition et à la forme des bulles dans la colonne de contact secondaire: | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| Distribution générale des bulles dans la colonne d'eau: | Centrée | | |
| Dans les zones occupées par des bulles: | | | |
| Taille moyenne des bulles observée | Moyenne | | |
| Distance moyenne des bulles prises deux à deux | Moyennement proche | | |
| Nombre de bulles par unité de surface photos | Petit | | |
| Forme générale des bulles observées | Grosse irrégulière et petite régulière | | |

III. Mesure du temps de résidence

Cette catégorie d'essai suit immédiatement la mesure du blanc. La procédure et les valeurs notées sont exactement les mêmes à l'exception des différences suivantes. Tout d'abord, avant de démarrer l'essai, le volume d'injection de 10 mL de la solution contenant le traceur à concentration de 0,1 g/mL est prélevé à l'aide de la seringue. Si la solution est déjà préparée, noter la date de la préparation dans le cahier de laboratoire et la masse de sulfites de sodium pesée exactement pour la fabrication de cette solution. S'il est nécessaire d'en préparer une nouvelle, suivre la procédure suivante :

Un volume de $50,0 \pm 0,5$ mL d'eau distillée est mesuré à l'aide d'un cylindre gradué. Un masse d'environ $5,000 \pm 0,0001$ g de sulfites de sodium est pesée exactement et ajoutée dans un bécher de 100 mL. L'eau distillée y est versée en s'assurant de récupérer toute la masse de sulfites et le tout est brassé à l'aide d'un barreau magnétique pour assurer la dissolution. Le bécher est ensuite fermé hermétiquement à l'aide de paraffine pour minimiser par la suite le contact de la solution avec l'air. La solution n'y est pas si sensible mais c'est tout de même un facteur d'influence affectant la qualité du signal produit par la solution à long terme. C'est une raison qui explique que le volume de la solution mère préparée n'est pas suffisant pour couvrir tous les essais à réaliser. C'est une contrainte pratique qui est apparue et qui a fait l'objet d'un compromis. Cette dernière peut se conserver à température pièce pendant environ une semaine suivant son utilisation tout en offrant une grandeur de signal similaire.

Dès lors, la seule manipulation supplémentaire par rapport à la mesure du blanc consiste à l'opération d'injection du traceur. Cette étape s'insère habituellement quelques secondes après le démarrage du film de la caméra numérique. La seringue contenant la solution est positionnée au port d'échantillonnage souhaité. Au niveau du port de l'injecteur venturi, la solution est versée uniformément dans la colonne de verre en évitant la présence de bulles d'air. Dès lors, l'injection est coordonnée avec l'heure s'écoulant sur le cadran qui est filmé par la caméra numérique. En regardant le cadran, un moment est rapidement choisie pour l'injection. Lorsque la seconde tombe, la valve de la colonne de verre est ouverte, le liquide

aspiré d'un trait et la valve refermée. L'heure d'injection choisie est ensuite notée dans le cahier de laboratoire. L'essai se poursuit alors normalement. Cependant, suite à l'injection, une surveillance accrue est apportée à l'équilibre des sondes. Dans le cas, où l'injection est réalisée sur l'autre port d'injection, la procédure est la même sauf pour la façon d'injecter la solution. Dans ce cas, la seringue peut être au préalable raccordée au port d'échantillonnage. À l'heure d'injection choisie en suivant le cadran, la valve d'eau est ouverte et la solution de la seringue est injectée en poussant sur le piston de façon contrôlée et à la même vitesse jusqu'à son extrémité. La valve d'eau est ensuite refermée. Voici un exemple de formulaire rempli pour ce type d'essai.

Tableau-A VI-2 Exemple de formulaire rempli pour la mesure du temps de résidence dans le cadre de l'expérience #6 en mode jet libre

| CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRIQUES | | | | | | |
|---|--|--------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|
| Note: Les zones ombragées sont celles nécessitant l'ajout de valeurs et les valeurs soulignées des liens hypertextes. | | | | | | |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | | | | | |
| No DE L'EXPÉRIENCE | 6 | | | | | |
| No DE LA SÉRIE D'ESSAIS | 1 | | | | | |
| CATÉGORIE DE L'ESSAI | Temps de résidence | | | | | |
| No RÉPÉTITION DE L'ESSAI | 1 | | | | | |
| DATE | 2011-12-12 | | | | | |
| No CAHIER LABORATOIRE | 4 | | pages | | 3 | |
| CONFIGURATION PILOTE | Mode jet libre | | | | | |
| DESCRIPTION SOMMAIRE | L'expérience se place dans le contexte de construction d'une base de référence pour le pilote pour fin de comparaison. Le mode jet libre est utilisé pour ce faire en raison de sa simplicité. Cependant, l'essai actuel cherche à établir une base de référence par rapport au déplacement d'une particule dans le pilote lorsque que le ratio du débit de gaz sur celui de l'eau gravite autour de 0,08 alors que l'eau est initialement déjà saturée en oxygène. Comme les valeurs de débits permettant d'atteindre ce ratio peuvent varier, l'essai se place dans le contexte où il n'y a aucune restriction sur le débit d'eau de la pompe et le débit d'air est ajusté en conséquence. | | | | | |
| MODE TRANSFERT DE L'EAU | circuit ouvert | | SENS DU TRANSFERT | | R2 vers R1 | |
| DÉBIT DE GAZ VISÉ | | | | | | |
| | Type de gaz | Débit-mètre | Débit gaz ciblé sur l'échelle | | Débit gaz ciblé corrigé | |
| | air comprimé | Fo | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | | mm | | mL/s |
| | | | 30,0 | 0,2 | 18,4 | 6,0 |
| | | | | | | mL/min |
| | | | | | 1104,0 | 360,0 |
| | | | | | | L/min |
| | | | | | 1,104 | 0,360 |
| DÉBIT D'EAU VISÉ | | | | | | |
| | Eau d'essai | Débit-mètre | Débit eau ciblé à l'affichage | | Débit eau ciblé corrigé | |
| | potable | électronique | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | L/min | L/min | L/min | L/min |
| | | | 10,7 | 0,1 | 13,7 | 0,4 |
| RATIO G/L VISÉ (DÉBIT GAZ/DÉBIT EAU) (L/min/L/min) | Théorique calculé | | | Chiffres significatifs ajustés | | |
| | | valeur | incertitude(±) | | valeur | incertitude(±) |
| | | 0,08053 | 0,02636 | | 8,1E-02 | 3E-02 |
| ÉTALONNAGE DES SONDES ET STABILITÉ POUR LA JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION | | | | | | |
| PARAMÈTRES | SONDES | | | | | |
| | O2 dissous | | | | pH | |
| | Milieu 100% humide | | Eau de référence à T° pièce | | Étalonnage réussi | |
| | Début | Fin | Début | Fin | | |
| [O2] (mg/L) | 8,83 | 8,60 | 10,02 | 9,88 | <u>Conductivité</u> | |
| [O2] (%) | 100,0 | 99,0 | 112,0 | 113,1 | Étalon de KCl 0,01 M | |
| Patm (kPa) | 102,7 | 102,5 | 102,7 | 102,5 | Début | Fin |
| T° (°C) | 22,2 | 22,9 | 21,5 | 22,7 | 22,2 | |
| (µS) | | | | | 1420 | |

| SOLUTIONS D'INJECTION | | | | | | |
|--|---------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| | Date de préparation | Volume préparé (±0,5mL) | Volume injecté (±0,5 mL) | Masse pesée (±0,0001g) | [massique] (g/mL) | incertitude (± g/mL) |
| Na₂SO₃ (sulfites de sodium) | 2011-12-12 | 50,0 | 10,0 | 5,2746 | 0,105 | 0,001 |
| PRÉPARATION POUR LA DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| MASSE PESÉE DE Na₂SO₃ (±0,0001g) | | | | | | |
| RÉSERVOIR SERVANT À DÉSOXYGÉNER | | | | R2 | | |
| TEMPS D'ATTENTE AVANT UTILISATION DE L'EAU | | | | ≥15 minutes | | |
| FICHER FILM CONTENANT LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES D'INTÉRÊT DE CET ESSAI | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | |
| 1. 2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_TR_001.MOV | | | | | | |
| FICHIERS IMAGES DE LA CAMÉRA HAUTE-VITESSE ASSOCIÉ À CET ESSAI | | | | | | |
| SECTION PHOTOS DE RÉFÉRENCE POUR CORRECTION D'IMAGE (SI NÉCESSAIRE) | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Panache2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Taille2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| SECTION DOSSIER CONTENANT LES PHOTOS ASSOCIÉES À CET ESSAI | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Panache2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_TR_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 61 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Taille2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_TR_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 67 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |

| DONNÉES EXPÉRIMENTALES | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-----------------|----------------------|---------|
| | | Lecture | Incertitude (±) | | |
| PRESSION ATMOSPHÉRIQUE (kPa) | | 102,6 | 0,3 | | |
| TEMPÉRATURE DU GAZ (°C) | | 21,5 | 0,1 | | |
| | | Format lecture | | Exprimé seulement en | |
| | | <i>heure</i> | <i>min</i> | <i>s</i> | |
| TEMPS TOTAL DE L'ESSAI (TTE) | | 18 | 31 | 18,52 | 1111 |
| TEMPS ÉCOULÉ POUR RÉGIME PERMANENT | | | 41 | 0,68 | 41 |
| DURÉE TOTALE DU FILM | | 13 | 16 | 13,27 | 796 |
| TEMPS ÉCOULÉ NOTÉ AVANT DÉBUT DU FILM | | 5 | 19 | 5,32 | 319 |
| MOMENT DE FIN DE L'ESSAI SUR LE FILM | | 13 | 12 | 13,20 | 792 |
| TEMPS « RÉEL » AVANT LE DÉBUT DU FILM | | 5 | 19 | 5,32 | 319 |
| HEURE FILMÉE DE L'INJECTION DU TRACEUR | 21 | 25 | 15 | inutile | inutile |
| MOMENT DE L'INJECTION SUR LE FILM | | | 19 | 0,32 | 19 |
| TEMPS « RÉEL » ÉCOULÉ AVANT L'INJECTION | | 5 | 38 | 5,63 | 338 |
| SECTION DÉBITS MESURÉS ET RATIO G/L EXPÉRIMENTAL | | | | | |
| VOLUME TOTAL D'EAU TRAITÉ | | Lu | Corrigé | | |
| | Unités | L | L | | |
| | | 196,3 | 255,0 | | |
| | Incertitude (±) | 0,1 | 0,4 | | |
| DÉBIT D'EAU MOYEN CALCULÉ | | Non corrigé | Corrigé | | |
| | unités | L/min | L/min | | |
| | | 10,60 | 13,77 | | |
| | incertitude (±) | 0,01 | 0,03 | | |

| DONNÉES DE PRESSION CORRIGÉES | | | | | | |
|--|------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Manomètres | A | A.1 | B | C | D | F |
| Force | Ligne d'eau | Ligne d'eau | Gaz cumulé | ligne d'eau | ligne d'eau | ligne de gaz |
| Position | Entrée injecteur | sortie injecteur | colonne de contact secondaire | sortie du haut vers les réservoirs | sortie du bas vers les réservoirs | entrée injecteur |
| Unités | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) |
| | 299,37 | 49,59 | 35,85 | 21,20 | 47,61 | -50,00 |
| | 298,33 | 49,59 | 35,85 | 21,71 | 47,97 | -48,98 |
| | 296,76 | 50,10 | 36,37 | 21,71 | 47,97 | -47,96 |
| | 296,24 | 49,59 | 36,37 | 21,71 | 47,61 | -47,96 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Moyenne | 298 | 49,7 | 36,1 | 21,6 | 47,8 | -49 |
| Écart-type | 1 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 1 |
| | | | | | | |
| SECTION ÉCHANTILLONAGE DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| MESURE DU pH DE L'EAU D'ESSAI INITIALE À TEMPÉRATURE PIÈCE | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | pH | | pH | | | |
| #1 | 7,82 | | 7,81 | | pH moyen | 7,82 |
| #2 | 7,81 | | 7,83 | | Écart-type | 0,01 |
| | | | | | | |
| MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ (ϕ) FINALE ASSOCIÉE À L'EAU D'ESSAI DÉSOXYGÉNÉE | | | | | | |
| Note: Ces valeurs sont les mêmes pour chaque type d'essai d'une même répétition d'une expérience | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | | |
| #1 | 418 | 22,7 | 417 | 22,7 | ϕ moyenne | 418 |
| #2 | 417 | 22,7 | 418 | 22,6 | Écart-type | 1 |
| | | | | | T moy ($^{\circ}$ C) | 22,7 |
| | | | | | Écart-type | 0,0 |
| | | | | | | |
| SECTION OXYGÈNE DISSOUS, TEMPÉRATURE, pH ET CONDUCTIVITÉ MESURÉS (tiré du fichier) | | | | | | |
| Compteur | Temps écoulé de l'expérience | Temps écoulé du film | [O ₂] dissous | Température de l'eau | Conductivité | Annotations |
| | ($\pm 0,02$ min) | (± 1 s) | ($\pm 0,2$ mg/L) | ($\pm 0,3$ $^{\circ}$ C) | (± 21 μ S) | |
| 1 | 5,32 | 0 | 9,02 | 22,4 | 307 | |
| 1 | 5,48 | 10 | 8,98 | 22,5 | 307 | |
| 1 | 5,63 | 19 | 8,96 | 22,5 | 307 | Injection |
| 1 | 5,68 | 22 | 8,96 | 22,6 | 307 | |
| 1 | 5,72 | 24 | 8,97 | 22,6 | 307 | |
| 1 | 5,75 | 26 | 8,99 | 22,6 | 307 | |
| 1 | 5,78 | 28 | 8,99 | 22,6 | 361 | |
| 1 | 5,82 | 30 | 9,00 | 22,6 | 392 | |
| 1 | 5,85 | 32 | 8,95 | 22,6 | 386 | |

| | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|----------------|
| 1 | 5,88 | 34 | 8,78 | 22,6 | 366 |
| 1 | 5,92 | 36 | 8,66 | 22,6 | 354 |
| 1 | 5,95 | 38 | 8,61 | 22,6 | 353 |
| 1 | 5,98 | 40 | 8,57 | 22,6 | 351 |
| 1 | 6,02 | 42 | 8,56 | 22,6 | 347 |
| 1 | 6,05 | 44 | 8,56 | 22,6 | 346 |
| 1 | 6,08 | 46 | 8,56 | 22,6 | 343 |
| 1 | 6,12 | 48 | 8,56 | 22,6 | 343 |
| 1 | 6,15 | 50 | 8,56 | 22,6 | 341 |
| 1 | 6,18 | 52 | 8,56 | 22,6 | 339 |
| 1 | 6,22 | 54 | 8,55 | 22,6 | 337 |
| 1 | 6,25 | 56 | 8,56 | 22,6 | 337 |
| 1 | 6,28 | 58 | 8,55 | 22,6 | 335 |
| 1 | 6,32 | 60 | 8,54 | 22,6 | 335 |
| 1 | 6,35 | 62 | 8,53 | 22,6 | 335 |
| 1 | 6,38 | 64 | 8,53 | 22,6 | 333 |
| 1 | 6,42 | 66 | 8,53 | 22,6 | 333 |
| 1 | 6,45 | 68 | 8,53 | 22,6 | 331 |
| 1 | 6,48 | 70 | 8,53 | 22,6 | 331 |
| 1 | 6,52 | 72 | 8,53 | 22,6 | 331 |
| 1 | 6,55 | 74 | 8,53 | 22,6 | 331 |
| 1 | 6,58 | 76 | 8,53 | 22,6 | 329 |
| 1 | 6,62 | 78 | 8,53 | 22,7 | 329 |
| 1 | 6,65 | 80 | 8,55 | 22,7 | 329 |
| 1 | 6,82 | 90 | 8,58 | 22,7 | 327 |
| 1 | 6,98 | 100 | 8,64 | 22,7 | 325 |
| 1 | 7,15 | 110 | 8,69 | 22,7 | 325 |
| 1 | 7,32 | 120 | 8,72 | 22,7 | 323 |
| 1 | 7,48 | 130 | 8,80 | 22,6 | 321 |
| 1 | 7,65 | 140 | 8,82 | 22,7 | 321 ajustement |
| 1 | 7,82 | 150 | 8,86 | 22,7 | 319 |
| 1 | 7,98 | 160 | 8,87 | 22,7 | 319 ajustement |
| 1 | 8,15 | 170 | 8,88 | 22,7 | 319 |
| 1 | 8,32 | 180 | 8,89 | 22,7 | 317 |
| 1 | 8,48 | 190 | 8,91 | 22,7 | 317 |
| 1 | 8,65 | 200 | 8,90 | 22,7 | 317 |
| 1 | 8,82 | 210 | 8,90 | 22,7 | 315 ajustement |
| 1 | 8,98 | 220 | 8,92 | 22,7 | 315 ajustement |
| 1 | 9,15 | 230 | 8,93 | 22,7 | 315 ajustement |
| 1 | 9,32 | 240 | 8,93 | 22,7 | 315 ajustement |
| 1 | 9,48 | 250 | 8,93 | 22,7 | 313 ajustement |
| 1 | 9,65 | 260 | 8,97 | 22,7 | 313 |
| 1 | 9,82 | 270 | 8,98 | 22,7 | 313 |
| 1 | 9,98 | 280 | 9,00 | 22,7 | 313 |
| 1 | 10,15 | 290 | 9,01 | 22,7 | 311 |
| 1 | 10,32 | 300 | 9,02 | 22,7 | 311 |
| 1 | 10,48 | 310 | 9,04 | 22,7 | 311 |
| 1 | 10,65 | 320 | 9,09 | 22,7 | 311 |
| 1 | 10,82 | 330 | 9,09 | 22,7 | 311 |
| 1 | 10,98 | 340 | 9,11 | 22,7 | 311 |

| | | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|-----|-------------|
| 1 | 11,15 | 350 | 9,11 | 22,7 | 311 | |
| 1 | 11,32 | 360 | 9,18 | 22,6 | 309 | |
| 1 | 11,48 | 370 | 9,38 | 22,5 | 309 | |
| 1 | 11,65 | 380 | 9,52 | 22,4 | 309 | ajustement |
| 1 | 11,82 | 390 | 9,59 | 22,2 | 309 | ajustement |
| 1 | 11,98 | 400 | 9,30 | 22,6 | 309 | |
| 1 | 12,15 | 410 | 9,24 | 22,6 | 309 | |
| 1 | 12,32 | 420 | 9,24 | 22,7 | 309 | |
| 1 | 12,48 | 430 | 9,24 | 22,7 | 309 | |
| 1 | 12,65 | 440 | 9,25 | 22,7 | 309 | |
| 1 | 12,82 | 450 | 9,25 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 12,98 | 460 | 9,26 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,15 | 470 | 9,25 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,32 | 480 | 9,25 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,48 | 490 | 9,24 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,65 | 500 | 9,22 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,82 | 510 | 9,22 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 13,98 | 520 | 9,21 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,15 | 530 | 9,23 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,32 | 540 | 9,24 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,48 | 550 | 9,24 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,65 | 560 | 9,27 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,82 | 570 | 9,27 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 14,98 | 580 | 9,30 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 15,15 | 590 | 9,30 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 15,32 | 600 | 9,30 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 15,48 | 610 | 9,30 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 15,65 | 620 | 9,29 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 15,82 | 630 | 9,29 | 22,7 | 307 | ajustement |
| 1 | 15,98 | 640 | 9,28 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 16,15 | 650 | 9,27 | 22,7 | 307 | |
| 1 | 16,32 | 660 | 9,28 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 16,48 | 670 | 9,29 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 16,65 | 680 | 9,28 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 16,82 | 690 | 9,29 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 16,98 | 700 | 9,30 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,15 | 710 | 9,29 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,32 | 720 | 9,29 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,48 | 730 | 9,28 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,65 | 740 | 9,28 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,82 | 750 | 9,29 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 17,98 | 760 | 9,27 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 18,15 | 770 | 9,27 | 22,7 | 305 | |
| 1 | 18,32 | 780 | 9,28 | 22,7 | 305 | |
| | 18,48 | 790 | | | | non valide |
| | 18,65 | 800 | | | | Arrêt essai |
| | 18,82 | 810 | | | | |
| | 18,98 | 820 | | | | |
| | 19,15 | 830 | | | | |
| | 19,32 | 840 | | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------------------|--|---|---------------------------------|
| | 19,48 | 850 | | | |
| | 19,65 | 860 | | | |
| | 19,82 | 870 | | | |
| | 19,98 | 880 | | | |
| | 20,15 | 890 | | | |
| | 20,32 | 900 | | | |
| | 20,48 | 910 | | | |
| | 20,65 | 920 | | | |
| | 20,82 | 930 | | | |
| | 20,98 | 940 | | | |
| | 21,15 | 950 | | | |
| | 21,32 | 960 | | | |
| | 21,48 | 970 | | | |
| | 21,65 | 980 | | | |
| | 21,82 | 990 | | | |
| | 21,98 | 1000 | | | |
| | 22,15 | 1010 | | | |
| | 22,32 | 1020 | | | |
| | 22,48 | 1030 | | | |
| | 22,65 | 1040 | | | |
| | 22,82 | 1050 | | | |
| | 22,98 | 1060 | | | |
| | 23,15 | 1070 | | | |
| | 23,32 | 1080 | | | |
| | 23,48 | 1090 | | | |
| | 23,65 | 1100 | | | |
| | 23,82 | 1110 | | | |
| | 23,98 | 1120 | | | |
| | 24,15 | 1130 | | | |
| | 24,32 | 1140 | | | |
| | 24,48 | 1150 | | | |
| | 24,65 | 1160 | | | |
| | 24,82 | 1170 | | | |
| | 24,98 | 1180 | | | |
| | 25,15 | 1190 | | | |
| | 25,32 | 1200 | | | |
| | 25,48 | 1210 | | | |
| | 25,65 | 1220 | | | |
| | 25,82 | 1230 | | | |
| | 25,98 | 1240 | | | |
| | 26,15 | 1250 | | | |
| | 26,32 | 1260 | | | |
| Nombre total de données | | | [O₂] dissous moyenne | Température moyenne de l'eau | Conductivité moyenne |
| 103 | | | (mg/L) | (°C) | (uS) |
| | | | 9,0 | 22,65 | 319 |
| | | Écart-type | 0,3 | 0,08 | 18 |

| SECTION COMMENTAIRES OU OBSERVATIONS LORS DE L'ESSAI | | | | | |
|--|--------|---------------|--------------------------------|--------|--------|
| Hauteur du panache de bulle non mesurée car sera le même estimé que les 5 premières expériences. | | | | | |
| SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA TAILLE MOYENNE DES BULLES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA HAUTEUR ET DE LA LARGEUR MOYENNE DU PANACHE DE BULLES | | | | | |
| DESCRIPTION QUALITATIVE DE LA DISTRIBUTION ET DE LA FORME DES BULLES | | | | | |
| Fichier des images traitées avec DraftSight: | | | | | |
| 1. Lien imalog | | 2. Sauvegarde | | | |
| Photos traitées CAM-HV\Temps de résidence\Exp#6_Tempsrésidence_1_2_001.dwg | | | | | |
| Dimensions de référence dans les photos (valeur de correction en mm): | | | | | |
| | | | | RP | 5,0 |
| | | | | RT | 5,0 |
| Photos traitées | | | | | |
| Configuration Panache de bulles | | | Configuration Taille de bulles | | |
| Paramètres | RP | H | L | RT | T |
| Valeur estimée à l'aide du logiciel (unité logiciel) | 0,2723 | | 2,0874 | 0,6897 | 0,6795 |
| | 0,2776 | | 2,0565 | 0,6949 | 0,6266 |
| | 0,2777 | | 2,0668 | 0,6949 | 0,7098 |
| | | | | | 0,4191 |
| | | | | | 0,1617 |
| | | | | | 0,2347 |
| | | | | | 0,5750 |
| | | | | 0,3506 | |
| Moyenne | 0,276 | #DIV/0! | 2,070 | 0,693 | 0,470 |
| Écart-type | 0,003 | #DIV/0! | 0,016 | 0,003 | 0,208 |
| Valeur réelle estimée (en mm) | | H | L | | T |
| | | | 37,833 | | 4,901 |
| | | | 37,273 | | 4,520 |
| | | | 37,460 | | 5,120 |
| | | | | | 3,023 |
| | | | | | 1,166 |
| | | | | | 1,693 |
| | | | | 4,148 | |
| | | | | 2,529 | |
| Moyenne | | #DIV/0! | 37,5 | | 3 |
| Écart-type | | #DIV/0! | 0,3 | | 2 |

| Description qualitative des caractéristiques associées à la répartition et à la forme des bulles dans la colonne de contact secondaire: | | | | | | |
|--|--|--|---|-----------------------------|-------------------------|-------|
| Distribution générale des bulles dans la colonne d'eau: | Centrée | | | | | |
| Dans les zones occupées par des bulles: | | | | | | |
| Taille moyenne des bulles observée | Moyenne | | | | | |
| Distance moyenne des bulles prises deux à deux | Moyennement proche | | | | | |
| Nombre de bulles par unité de surface photos | Petit | | | | | |
| Forme générale des bulles observées | Grosse irrégulière et petite régulière | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| TRAITEMENT PRIMAIRE DES DONNÉES DE CONDUCTIVITÉ POUR FIN DE CONSTRUCTION DES GRAPHIQUES ET DE DIVERS RÉSULTATS D'INTÉRÊT ASSOCIÉS À LA PRÉSENCE D'UN MARQUEUR DANS LE SYSTÈME. | | | | | | |
| TEMPS translaté t_i ($\pm 0,3$ min) | Conductivité ϕ (± 21 uS) | Annotations ($t_R; t_0; t_{max}$) | Conductivité translatée $\Delta\phi_i$ (± 21 uS) | $\Delta\phi_i * \Delta t_i$ | Résultats d'intérêts | |
| -0,32 | 307 | | 0 | | | |
| -0,15 | 307 | | 0 | | t_0 | 5,63 |
| 0,00 | 307 | t_0 | 0 | | t_{max} | 0,183 |
| 0,05 | 307 | | 0 | 0,0 | t_R | 5,68 |
| 0,08 | 307 | | 0 | 0,0 | ϕ_0 | 307 |
| 0,12 | 307 | | 0 | 0,0 | ϕ_{max} | 392 |
| 0,15 | 361 | | 54 | 1,8 | ϕ_R | 309 |
| 0,18 | 392 | t_{max} | 85 | 2,8 | $\approx f$ | 75,0 |
| 0,22 | 386 | | 79 | 2,6 | $\approx f < t_{max}$ | 4,6 |
| 0,25 | 366 | | 59 | 2,0 | $\approx f > t_{max}$ | 70,3 |
| 0,28 | 354 | | 47 | 1,6 | Aire Δ | 241,5 |
| 0,32 | 353 | | 46 | 1,5 | Aire $\Delta < t_{max}$ | 7,8 |
| 0,35 | 351 | | 44 | 1,5 | Aire $\Delta > t_{max}$ | 233,8 |
| 0,38 | 347 | | 40 | 1,3 | | |
| 0,42 | 346 | | 39 | 1,3 | | |
| 0,45 | 343 | | 36 | 1,2 | | |
| 0,48 | 343 | | 36 | 1,2 | | |
| 0,52 | 341 | | 34 | 1,1 | | |
| 0,55 | 339 | | 32 | 1,1 | | |
| 0,58 | 337 | | 30 | 1,0 | | |
| 0,62 | 337 | | 30 | 1,0 | | |
| 0,65 | 335 | | 28 | 0,9 | | |
| 0,68 | 335 | | 28 | 0,9 | | |
| 0,72 | 335 | | 28 | 0,9 | | |
| 0,75 | 333 | | 26 | 0,9 | | |
| 0,78 | 333 | | 26 | 0,9 | | |
| 0,82 | 331 | | 24 | 0,8 | | |
| 0,85 | 331 | | 24 | 0,8 | | |
| 0,88 | 331 | | 24 | 0,8 | | |
| 0,92 | 331 | | 24 | 0,8 | | |
| 0,95 | 329 | | 22 | 0,7 | | |

| | | | | | |
|------|--------|--|----|-----|--|
| 0,98 | 329 | | 22 | 0,7 | |
| 1,02 | 329 | | 22 | 0,7 | |
| 1,18 | 327 | | 20 | 3,3 | |
| 1,35 | 325 | | 18 | 3,0 | |
| 1,52 | 325 | | 18 | 3,0 | |
| 1,68 | 323 | | 16 | 2,7 | |
| 1,85 | 321 | | 14 | 2,3 | |
| 2,02 | 321 | | 14 | 2,3 | |
| 2,18 | 319 | | 12 | 2,0 | |
| 2,35 | 319 | | 12 | 2,0 | |
| 2,52 | 319 | | 12 | 2,0 | |
| 2,68 | 317 | | 10 | 1,7 | |
| 2,85 | 317 | | 10 | 1,7 | |
| 3,02 | 317 | | 10 | 1,7 | |
| 3,18 | 315 | | 8 | 1,3 | |
| 3,35 | 315 | | 8 | 1,3 | |
| 3,52 | 315 | | 8 | 1,3 | |
| 3,68 | 315 | | 8 | 1,3 | |
| 3,85 | 313 | | 6 | 1,0 | |
| 4,02 | 313 | | 6 | 1,0 | |
| 4,18 | 313 | | 6 | 1,0 | |
| 4,35 | 313 | | 6 | 1,0 | |
| 4,52 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 4,68 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 4,85 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 5,02 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 5,18 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 5,35 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 5,52 | 311 | | 4 | 0,7 | |
| 5,68 | 309 tR | | 2 | 0,3 | |
| 5,85 | 309 | | 2 | | |
| 6,02 | 309 | | 2 | | |
| 6,18 | 309 | | 2 | | |
| 6,35 | 309 | | 2 | | |
| 6,52 | 309 | | 2 | | |
| 6,68 | 309 | | 2 | | |
| 6,85 | 309 | | 2 | | |
| 7,02 | 309 | | 2 | | |
| 7,18 | 307 | | 0 | | |
| 7,35 | 307 | | 0 | | |
| 7,52 | 307 | | 0 | | |
| 7,68 | 307 | | 0 | | |
| 7,85 | 307 | | 0 | | |
| 8,02 | 307 | | 0 | | |
| 8,18 | 307 | | 0 | | |
| 8,35 | 307 | | 0 | | |
| 8,52 | 307 | | 0 | | |
| 8,68 | 307 | | 0 | | |
| 8,85 | 307 | | 0 | | |
| 9,02 | 307 | | 0 | | |

| | | | | | | |
|------|--------|--|----|-----|--|--|
| 0,98 | 329 | | 22 | 0,7 | | |
| 1,02 | 329 | | 22 | 0,7 | | |
| 1,18 | 327 | | 20 | 3,3 | | |
| 1,35 | 325 | | 18 | 3,0 | | |
| 1,52 | 325 | | 18 | 3,0 | | |
| 1,68 | 323 | | 16 | 2,7 | | |
| 1,85 | 321 | | 14 | 2,3 | | |
| 2,02 | 321 | | 14 | 2,3 | | |
| 2,18 | 319 | | 12 | 2,0 | | |
| 2,35 | 319 | | 12 | 2,0 | | |
| 2,52 | 319 | | 12 | 2,0 | | |
| 2,68 | 317 | | 10 | 1,7 | | |
| 2,85 | 317 | | 10 | 1,7 | | |
| 3,02 | 317 | | 10 | 1,7 | | |
| 3,18 | 315 | | 8 | 1,3 | | |
| 3,35 | 315 | | 8 | 1,3 | | |
| 3,52 | 315 | | 8 | 1,3 | | |
| 3,68 | 315 | | 8 | 1,3 | | |
| 3,85 | 313 | | 6 | 1,0 | | |
| 4,02 | 313 | | 6 | 1,0 | | |
| 4,18 | 313 | | 6 | 1,0 | | |
| 4,35 | 313 | | 6 | 1,0 | | |
| 4,52 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 4,68 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 4,85 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 5,02 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 5,18 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 5,35 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 5,52 | 311 | | 4 | 0,7 | | |
| 5,68 | 309 tR | | 2 | 0,3 | | |
| 5,85 | 309 | | 2 | | | |
| 6,02 | 309 | | 2 | | | |
| 6,18 | 309 | | 2 | | | |
| 6,35 | 309 | | 2 | | | |
| 6,52 | 309 | | 2 | | | |
| 6,68 | 309 | | 2 | | | |
| 6,85 | 309 | | 2 | | | |
| 7,02 | 309 | | 2 | | | |
| 7,18 | 307 | | 0 | | | |
| 7,35 | 307 | | 0 | | | |
| 7,52 | 307 | | 0 | | | |
| 7,68 | 307 | | 0 | | | |
| 7,85 | 307 | | 0 | | | |
| 8,02 | 307 | | 0 | | | |
| 8,18 | 307 | | 0 | | | |
| 8,35 | 307 | | 0 | | | |
| 8,52 | 307 | | 0 | | | |
| 8,68 | 307 | | 0 | | | |
| 8,85 | 307 | | 0 | | | |
| 9,02 | 307 | | 0 | | | |

IV. Mesure du zéro

Cet essai suit immédiatement la mesure du temps de résidence. La procédure de base est appliquée à l'exception des distinctions suivantes. Avant de démarrer l'essai, il faut procéder à la désoxygénation de l'eau. À l'aide d'une balance de précision, il faut peser exactement mais approximativement $18,0000 \pm 0,0001$ g de sulfites. La valeur est ajustée en fonction du taux d'oxygène initialement observé pour l'eau d'essai lors de la mesure du blanc ou bien de la mesure du temps de résidence. Cette masse doit être notée. Elle devrait permettre de désoxygéner l'eau à un taux d'oxygène se situant entre 2,00 et 3,00 mg/L. Cette masse est ensuite ajoutée complètement à l'eau du réservoir. À l'aide d'une perceuse muni d'un long mélangeur en métal, l'eau est brassée pendant environ 3 minutes et laissée au repos pendant environ 15 minutes. Les quatre bouteilles de DBO contenant l'eau d'essai initialement échantillonné avant le début de la mesure du blanc sont à ce moment testées pour leur pH. Deux sont identifiées par «bas du réservoir» et numérotée de un à deux respectant l'ordre de prélèvement. Les deux autres sont identifiées par «haut du réservoir» et numéroté pour les mêmes raisons. Après les lectures, les échantillons sont conservées jusqu'à la toute fin de la journée d'expérience. Ensuite, la sonde de conductivité est remplacée par celle de la mesure du pH dans le cylindre approprié. À la fin du temps d'attente après brassage de l'eau d'essai, les quatre aliquotes pour la mesure de la conductivité sont prélevés à même l'eau désoxygénée du réservoir et respectant le même schéma d'identification que pour la mesure du pH initiale. Il est possible de mesurer immédiatement ces quatre échantillons recueillis ou d'attendre à la toute fin de l'expérience. Leur valeur de conductivité et de température sont notées à l'endroit prévu dans le cahier de laboratoire. Même si mesurées à cette étape, les échantillons sont préservés jusqu'à la toute fin par précaution. Avant de démarrer la pompe et l'essai proprement dit, il est nécessaire de fermer la valve principale d'entrée du gaz dans le pilote. Dans cet essai aucun gaz n'est ajouté, il n'y a pas de film réalisé à l'aide de la caméra haute-vitesse et il n'y a pas de lecture de débit ou de température du gaz. Le reste suit la même procédure d'essai qui est aussi vu comme une étape de conditionnement de l'eau désoxygénée. Voici un exemple d'un formulaire rempli pour ce type d'essai.

Tableau-A VI-3 Exemple de formulaire rempli pour la mesure du zéro dans le cadre de l'expérience #6 en mode jet libre

| CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRIQUES | | | | | | |
|---|--|----------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------|
| Note: Les zones ombragées sont celles nécessitant l'ajout de valeurs et les valeurs soulignées des liens hypertextes. | | | | | | |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | | | | | |
| No DE L'EXPÉRIENCE | 6 | | | | | |
| No DE LA SÉRIE D'ESSAIS | 1 | | | | | |
| CATÉGORIE DE L'ESSAI | Mesure du Zéro | | | | | |
| No RÉPÉTITION DE L'ESSAI | 1 | | | | | |
| DATE | 2011-12-12 | | | | | |
| No CAHIER LABORATOIRE | 4 | | pages | | 4 | |
| CONFIGURATION PILOTE | Mode jet libre | | | | | |
| DESCRIPTION SOMMAIRE | L'expérience se place dans le contexte de construction d'une base de référence pour le pilote pour fin de comparaison. Le mode jet libre est utilisé pour ce faire en raison de sa simplicité. Cependant, l'essai actuel cherche à établir dans le cadre de l'expérience en cours ce que l'on appelle le «Zéro» de la concentration initiale de l'eau désoxygénée. Permet d'établir la base pour la quantification de la réoxygénation de l'eau. Cet essai est nécessaire pour toute expérience et réalisé dans les mêmes conditions appelées «conditionnement de l'eau d'essai initialement désoxygénée». Tous les essais de ce type peuvent donc être comparés l'un à l'autre. | | | | | |
| MODE TRANSFERT DE L'EAU | circuit ouvert | | SENS DU TRANSFERT | | R1 vers R2 | |
| DÉBIT DE GAZ VISÉ | | | | | | |
| | Type de gaz | Débit-mètre | Débit gaz ciblé sur l'échelle | | Débit gaz ciblé corrigé | |
| | aucun | aucun | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | 0,0 | | 0,0 | 0,0 |
| | | | | | | mL/s |
| | | | | | 0,0 | 0,0 |
| | | | | | | mL/min |
| | | | | | 0,000 | 0,000 |
| | | | | | | L/min |
| DÉBIT D'EAU VISÉ | | | | | | |
| | Eau d'essai | Débit-mètre | Débit eau ciblé à l'affichage | | Débit eau ciblé corrigé | |
| | potable | électronique | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | L/min | L/min | L/min | L/min |
| | | | 10,9 | 0,1 | 14,0 | 0,4 |
| RATIO G/L VISÉ (DÉBIT GAZ/DÉBIT EAU) (L/min/L/min) | Théorique calculé | | | Chiffres significatifs ajustés | | |
| | valeur | incertitude(±) | | | valeur | incertitude(±) |
| | 0,00000 | #DIV/0! | | | 0,0E+00 | #DIV/0! |
| ÉTALONNAGE DES SONDÉS ET STABILITÉ POUR LA JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION | | | | | | |
| PARAMÈTRES | | | SONDES | | | |
| | O2 dissous | | | | pH | |
| | Milieu 100% humide | | Eau de référence à T° pièce | | Étalonnage réussi | |
| | Début | Fin | Début | Fin | | |
| [O2] (mg/L) | 8,83 | 8,60 | 10,02 | 9,88 | Conductivité | |
| [O2] (%) | 100,0 | 99,0 | 112,0 | 113,1 | Étalon de KCl 0,01 M | |
| Patm (kPa) | 102,7 | 102,5 | 102,7 | 102,5 | Début | Fin |
| T° (°C) | 22,2 | 22,9 | 21,5 | 22,7 | 22,2 | |
| (µS) | | | | | 1420 | |

| SOLUTIONS D'INJECTION | | | | | | |
|--|---------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| | Date de préparation | Volume préparé (±0,5 mL) | Volume injecté (±0,5 mL) | Masse pesée (±0,0001g) | [massique] (g/mL) | incertitude (± g/mL) |
| Na ₂ SO ₃ (sulfites de sodium) | | 50,0 | 10,0 | | 0,000 | #DIV/0! |
| PRÉPARATION POUR LA DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| MASSE PESÉE DE Na₂SO₃ (±0,0001g) | | | | 18,0158 | | |
| RÉSERVOIR SERVANT À DÉSOXYGÉNER | | | | R1 | | |
| TEMPS D'ATTENTE AVANT UTILISATION DE L'EAU | | | | ≥15 minutes | | |
| FICHER FILM CONTENANT LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES D'INTÉRÊT DE CET ESSAI | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| 1. 2011-12-12_F6A_GsurL=0,08_Zéro.MOV | | | | | | |
| FICHIERS IMAGES DE LA CAMÉRA HAUTE-VITESSE ASSOCIÉ À CET ESSAI | | | | | | |
| SECTION PHOTOS DE RÉFÉRENCE POUR CORRECTION D'IMAGE (SI NÉCESSAIRE) | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Panache2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Taille2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| SECTION DOSSIER CONTENANT LES PHOTOS ASSOCIÉES À CET ESSAI | | | | | | |
| 1. Lien Imalog | | | 2. Sauvegarde | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| inutile | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |

| DONNÉES EXPÉRIMENTALES | | | | | |
|--|----------------|----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| | | Lecture | Incertitude (±) | | |
| PRESSION ATMOSPHÉRIQUE (kPa) | | 102,6 | 0,3 | | |
| TEMPÉRATURE DU GAZ (°C) | | | 0,1 | | |
| | | Format lecture | | Exprimé seulement en | |
| | | heure | min | s | min (±0,02) s (±1) |
| TEMPS TOTAL DE L'ESSAI (TTE) | | 17 | | 59 | 17,98 1079 |
| TEMPS ÉCOULÉ POUR RÉGIME PERMANENT | | | | 29 | 0,48 29 |
| DURÉE TOTALE DU FILM | | 12 | | 15 | 12,25 735 |
| TEMPS ÉCOULÉ NOTÉ AVANT DÉBUT DU FILM | | 5 | | 47 | 5,78 347 |
| MOMENT DE FIN DE L'ESSAI SUR LE FILM | | 12 | | 13 | 12,22 733 |
| TEMPS « RÉEL » AVANT LE DÉBUT DU FILM | | 5 | | 46 | 5,77 346 |
| <i>(Ne s'applique pas à cet essai)</i> | | | | | |
| HEURE FILMÉE DE L'INJECTION DU TRACEUR | | | | | inutile inutile |
| MOMENT DE L'INJECTION SUR LE FILM | | | | | |
| TEMPS « RÉEL » ÉCOULÉ AVANT L'INJECTION | | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! |
| SECTION DÉBITS MESURÉS ET RATIO G/L EXPÉRIMENTAL | | | | | |
| VOLUME TOTAL D'EAU TRAITÉ | | Lu | Corrigé | | |
| | Unités | L | L | | |
| | | 195,7 | 254,2 | | |
| | Incertitude(±) | 0,1 | 0,4 | | |
| DÉBIT D'EAU MOYEN CALCULÉ | | Non corrigé | Corrigé | | |
| | unités | L/min | L/min | | |
| | | 10,88 | 14,14 | | |
| | incertitude(±) | 0,01 | 0,03 | | |

| DONNÉES DE PRESSION CORRIGÉES | | | | | | |
|--|------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Manomètre: | A | A.1 | B | C | D | F |
| Force | Ligne d'eau | Ligne d'eau | Gaz cumulé | ligne d'eau | ligne d'eau | ligne de gaz |
| Position | Entrée injecteur | sortie injecteur | colonne de contact secondaire | sortie du haut vers les réservoirs | sortie du bas vers les réservoirs | entrée injecteur |
| Unités | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) |
| | 299,37 | 45,02 | 32,75 | 17,23 | 43,68 | -94,99 |
| | 296,76 | 45,02 | 32,75 | 17,64 | 43,68 | -94,48 |
| | 295,20 | 44,51 | 33,26 | 17,23 | 43,33 | -94,99 |
| | 294,15 | 44,51 | 32,75 | 17,13 | 43,68 | -93,97 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Moyenne | 296 | 44,8 | 32,9 | 17,3 | 43,6 | -94,6 |
| Écart-type | 2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,5 |
| SECTION ÉCHANTILLONAGE DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| MESURE DU pH DE L'EAU D'ESSAI INITIALE À TEMPÉRATURE PIÈCE | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | pH | | pH | | | |
| #1 | 7,82 | | 7,81 | | pH moyen | 7,82 |
| #2 | 7,81 | | 7,83 | | Écart-type | 0,01 |
| | | | | | | |
| MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ (ϕ) FINALE ASSOCIÉE À L'EAU D'ESSAI DÉSOXYGÉNÉE | | | | | | |
| Note: Ces valeurs sont les mêmes pour chaque type d'essai d'une même répétition d'une expérience | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | (μ S) | T ($^{\circ}$ C) | | |
| #1 | 418 | 22,7 | 417 | 22,7 | ϕ moyenne | 418 |
| #2 | 417 | 22,7 | 418 | 22,6 | Écart-type | 1 |
| | | | | | T moy ($^{\circ}$ C) | 22,7 |
| | | | | | Écart-type | 0,0 |
| SECTION OXYGÈNE DISSOUS, TEMPÉRATURE, pH ET CONDUCTIVITÉ MESURÉS (tiré du fichier) | | | | | | |
| Compteur | Temps écoulé de l'expérience | Temps écoulé du film | [O ₂] dissous | Température de l'eau | pH | Annotations |
| | ($\pm 0,02$ min) | (± 1 s) | ($\pm 0,2$ mg/L) | ($\pm 0,3$ $^{\circ}$ C) | $\pm 0,01$ | |
| 1 | 5,77 | 0 | 2,89 | 23,0 | 8,00 | |
| 1 | 5,93 | 10 | 2,57 | 23,1 | 8,00 | |
| 1 | 6,10 | 20 | 2,35 | 23,1 | 8,00 | |
| 1 | 6,27 | 30 | 2,16 | 23,1 | 8,00 | |
| 1 | 6,43 | 40 | 2,04 | 23,2 | 8,00 | |
| 1 | 6,60 | 50 | 1,93 | 23,2 | 8,00 | |
| 1 | 6,77 | 60 | 1,86 | 23,2 | 8,00 | |
| 1 | 6,93 | 70 | 1,79 | 23,2 | 8,00 | |
| 1 | 7,10 | 80 | 1,71 | 23,2 | 8,00 | |

| | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|------|
| 1 | 7,27 | 90 | 1,67 | 23,2 | 8,00 |
| 1 | 7,43 | 100 | 1,63 | 23,2 | 8,00 |
| 1 | 7,60 | 110 | 1,60 | 23,2 | 8,00 |
| 1 | 7,77 | 120 | 1,57 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 7,93 | 130 | 1,54 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,10 | 140 | 1,52 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,27 | 150 | 1,50 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,43 | 160 | 1,48 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,60 | 170 | 1,47 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,77 | 180 | 1,45 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 8,93 | 190 | 1,43 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,10 | 200 | 1,42 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,27 | 210 | 1,41 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,43 | 220 | 1,40 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,60 | 230 | 1,39 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,77 | 240 | 1,39 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 9,93 | 250 | 1,38 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,10 | 260 | 1,38 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,27 | 270 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,43 | 280 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,60 | 290 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,77 | 300 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 10,93 | 310 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,10 | 320 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,27 | 330 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,43 | 340 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,60 | 350 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,77 | 360 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 11,93 | 370 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,10 | 380 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,27 | 390 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,43 | 400 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,60 | 410 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,77 | 420 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 12,93 | 430 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,10 | 440 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,27 | 450 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,43 | 460 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,60 | 470 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,77 | 480 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 13,93 | 490 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,10 | 500 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,27 | 510 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,43 | 520 | 1,34 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,60 | 530 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,77 | 540 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 14,93 | 550 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 15,10 | 560 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 15,27 | 570 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 15,43 | 580 | 1,35 | 23,3 | 8,00 |

| | | | | | |
|---|-------|------|------|------|-------------|
| 1 | 15,60 | 590 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 15,77 | 600 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 15,93 | 610 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,10 | 620 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,27 | 630 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,43 | 640 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,60 | 650 | 1,36 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,77 | 660 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 16,93 | 670 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,10 | 680 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,27 | 690 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,43 | 700 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,60 | 710 | 1,37 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,77 | 720 | 1,38 | 23,3 | 8,00 |
| 1 | 17,93 | 730 | 1,39 | 23,3 | 8,00 |
| | 18,10 | 740 | | | Arrêt essai |
| | 18,27 | 750 | | | |
| | 18,43 | 760 | | | |
| | 18,60 | 770 | | | |
| | 18,77 | 780 | | | |
| | 18,93 | 790 | | | |
| | 19,10 | 800 | | | |
| | 19,27 | 810 | | | |
| | 19,43 | 820 | | | |
| | 19,60 | 830 | | | |
| | 19,77 | 840 | | | |
| | 19,93 | 850 | | | |
| | 20,10 | 860 | | | |
| | 20,27 | 870 | | | |
| | 20,43 | 880 | | | |
| | 20,60 | 890 | | | |
| | 20,77 | 900 | | | |
| | 20,93 | 910 | | | |
| | 21,10 | 920 | | | |
| | 21,27 | 930 | | | |
| | 21,43 | 940 | | | |
| | 21,60 | 950 | | | |
| | 21,77 | 960 | | | |
| | 21,93 | 970 | | | |
| | 22,10 | 980 | | | |
| | 22,27 | 990 | | | |
| | 22,43 | 1000 | | | |
| | 22,60 | 1010 | | | |
| | 22,77 | 1020 | | | |
| | 22,93 | 1030 | | | |
| | 23,10 | 1040 | | | |
| | 23,27 | 1050 | | | |
| | 23,43 | 1060 | | | |
| | 23,60 | 1070 | | | |
| | 23,77 | 1080 | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|------|---------------------------------|---|-----------------|
| | 23,93 | 1090 | | | |
| | 24,10 | 1100 | | | |
| | 24,27 | 1110 | | | |
| | 24,43 | 1120 | | | |
| | 24,60 | 1130 | | | |
| | 24,77 | 1140 | | | |
| | 24,93 | 1150 | | | |
| | 25,10 | 1160 | | | |
| | 25,27 | 1170 | | | |
| | 25,43 | 1180 | | | |
| | 25,60 | 1190 | | | |
| | 25,77 | 1200 | | | |
| | 25,93 | 1210 | | | |
| | 26,10 | 1220 | | | |
| | 26,27 | 1230 | | | |
| | 26,43 | 1240 | | | |
| | 26,60 | 1250 | | | |
| | 26,77 | 1260 | | | |
| | 26,93 | 1270 | | | |
| | 27,10 | 1280 | | | |
| | 27,27 | 1290 | | | |
| | 27,43 | 1300 | | | |
| | 27,60 | 1310 | | | |
| | 27,77 | 1320 | | | |
| | 27,93 | 1330 | | | |
| | 28,10 | 1340 | | | |
| | 28,27 | 1350 | | | |
| | 28,43 | 1360 | | | |
| | 28,60 | 1370 | | | |
| | 28,77 | 1380 | | | |
| | 28,93 | 1390 | | | |
| | 29,10 | 1400 | | | |
| | 29,27 | 1410 | | | |
| | 29,43 | 1420 | | | |
| | 29,60 | 1430 | | | |
| | 29,77 | 1440 | | | |
| | 29,93 | 1450 | | | |
| | 30,10 | 1460 | | | |
| | 30,27 | 1470 | | | |
| | 30,43 | 1480 | | | |
| | 30,60 | 1490 | | | |
| | 30,77 | 1500 | | | |
| Nombre total de données | | | [O2] dissous moyenne | Température moyenne de l'eau | pH moyen |
| 74 | | | (mg/L) | (°C) | |
| | | | 1,5 | 23,28 | 8,00 |
| | Écart-type | | 0,3 | 0,06 | 0,00 |

V. Mesure de la réoxygénation

Ce type d'essai suit immédiatement la mesure du zéro. Cette fois il est primordial que la valve principale d'entrée de gaz soit ouverte. La même procédure et les mêmes conditions d'ajout de gaz que lors de l'essai du blanc sont appliquées. Les identifications sont corrigées en conséquence dans le cahier de laboratoire. Ce type d'essai est répété au besoin et numéroté suivant le cas. En effet, il permet d'oxygéner de nouveau l'eau d'essai et d'en mesurer la performance. Le choix est de cesser toute nouvelle répétition lorsqu'il est évident que le taux d'oxygène recommence à baisser suivant celui observé lors du dernier essai. Observation importante cependant, il est préférable d'ajouter un essai si le taux d'oxygène demeure à peu près le même à l'essai précédent. Ce choix se justifie en raison de la correction qui sera faite sur le taux d'oxygène mesurée suivant l'augmentation de la température de l'eau d'essai. En effet, un taux maintenu constant peut signifier que l'oxygène nouvellement dissout a simplement compensé la valeur naturellement à la baisse observée lorsque la température de l'eau augmente. Il faut donc tenir compte de cette possibilité. Voici ainsi un autre exemple des données colligées lors de ce type d'essai.

Tableau-A VI-4 Exemple de formulaire rempli pour un essai de mesure de la réoxygénation dans le cadre de l'expérience #6 en mode jet libre

| CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRIQUES | | | | | | |
|---|---|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|
| Note: Les zones ombragées sont celles nécessitant l'ajout de valeurs et les valeurs soulignées des liens hypertextes. | | | | | | |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | | | | | |
| No DE L'EXPÉRIENCE | 6 | | | | | |
| No DE LA SÉRIE D'ESSAIS | 1 | | | | | |
| CATÉGORIE DE L'ESSAI | Réoxygénation | | | | | |
| No RÉPÉTITION DE L'ESSAI | 1 | | | | | |
| DATE | 2011-12-12 | | | | | |
| No CAHIER LABORATOIRE | 4 | | pages | | 5 | |
| CONFIGURATION PILOTE | Mode jet libre | | | | | |
| DESCRIPTION SOMMAIRE | L'expérience se place dans le contexte de construction d'une base de référence pour le pilote pour fin de comparaison. Le mode jet libre est utilisé pour ce faire en raison de sa simplicité. Cependant, l'essai actuel cherche à établir la performance de réoxygénation lorsque que le ratio du débit de gaz sur celui de l'eau gravite autour de 0,08. Quel est l'effet de cet ajout d'air. Comme les valeurs de débits permettant d'atteindre ce ratio peuvent varier, l'essai se place dans le contexte où il n'y a aucune restriction sur le débit d'eau de la pompe et le débit d'air est ajusté en conséquence. Cet essai fixe la quantité initiale en oxygène transférée par le pilote pour resaturer l'eau à partir de l'oxygène présent dans le gaz | | | | | |
| MODE TRANSFERT DE L'EAL | circuit ouvert | | SENS DU TRANSFERT | | R2 vers R1 | |
| DÉBIT DE GAZ VISÉ | | | | | | |
| | Type de gaz | Débit-mètre | Débit gaz ciblé sur l'échelle | | Débit gaz ciblé corrigé | |
| | air comprimé | Fo | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | | mm | | mL/s |
| | | | 30,0 | 0,2 | 18,4 | 6,0 |
| | | | | | | mL/min |
| | | | | | 1104,0 | 360,0 |
| | | | | | | L/min |
| | | | | | 1,104 | 0,360 |
| DÉBIT D'EAU VISÉ | | | | | | |
| | <u>Eau d'essai</u> | Débit-mètre | Débit eau ciblé à l'affichage | | Débit eau ciblé corrigé | |
| | potable | électronique | valeur | incertitude(±) | valeur | incertitude(±) |
| | | | L/min | L/min | L/min | L/min |
| | | | 10,7 | 0,1 | 13,7 | 0,4 |
| RATIO G/L VISÉ | | | | | | |
| (DÉBIT GAZ/DÉBIT EAU) (L/min/L/min) | Théorique calculé | | | | Chiffres significatifs ajustés | |
| | | valeur | incertitude(±) | | valeur | incertitude(±) |
| | | 0,08053 | 0,02636 | | 8,1E-02 | 3E-02 |
| ÉTALONNAGE DES SONDES ET STABILITÉ POUR LA JOURNÉE D'EXPÉRIMENTATION | | | | | | |
| PARAMÈTRES | | | | | | |
| SONDES | | | | | | |
| O2 dissous | | | | | | |
| pH | | | | | | |
| Milieu 100% humide | | | | | | |
| Eau de référence à T° pièce | | | | | | |
| Étalonnage réussi | | | | | | |
| | Début | Fin | Début | Fin | | |
| [O2] (mg/L) | 8,83 | 8,60 | 10,02 | 9,88 | Conductivité | |
| [O2] (%) | 100,0 | 99,0 | 112,0 | 113,1 | Étalon de KCl 0,01 M | |
| Patm (kPa) | 102,7 | 102,5 | 102,7 | 102,5 | Début | Fin |
| T° (°C) | 22,2 | 22,9 | 21,5 | 22,7 | 22,2 | |
| (µS) | | | | | 1420 | |

| SOLUTIONS D'INJECTION | | | | | | |
|--|---------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| | Date de préparation | Volume préparé (±0,5 mL) | Volume injecté (±0,5 mL) | Masse pesée (±0,0001g) | [massique] (g/mL) | incertitude (± g/mL) |
| Na₂SO₃ (sulfites de sodium) | | 50,0 | 10,0 | | 0,000 | #DIV/0! |
| PRÉPARATION POUR LA DÉSOXYGÉNATION DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| <i>Ne s'applique pas à cet essai</i> | | | | | | |
| MASSE PESÉE DE Na₂SO₃ (±0,0001g) | | | | | | |
| RÉSERVOIR SERVANT À DÉSOXYGÉNER | | | | R2 | | |
| TEMPS D'ATTENTE AVANT UTILISATION DE L'EAU | | | | ≥15 minutes | | |
| FICHER FILM CONTENANT LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES D'INTÉRÊT DE CET ESSAI | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | | |
| 1. 2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Reox_001.MOV | | | | | | |
| FICHIERS IMAGES DE LA CAMÉRA HAUTE-VITESSE ASSOCIÉ À CET ESSAI | | | | | | |
| SECTION PHOTOS DE RÉFÉRENCE POUR CORRECTION D'IMAGE (SI NÉCESSAIRE) | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Panache2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Taille2011-12-24_mesuredereference_sans-eau_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| SECTION DOSSIER CONTENANT LES PHOTOS ASSOCIÉES À CET ESSAI | | | | | | |
| <i>1. Lien Imalog</i> | | <i>2. Sauvegarde</i> | | | | |
| Concernant les images de la forme du jet d'eau (panache) à sa sortie du tuyau de contact primaire | | | | | | |
| 1. ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Panache2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Reox_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 16 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |
| Concernant les images pour la taille des bulles dans le jet d'eau | | | | | | |
| 1. \ImagesCamHaute-vitesse\Exp#6Jetlibre_Gsurl=0,08\Taille2011-12-12_F6A_Gsurl=0,08_Reox_001 | | | | | | |
| 2. | | | | | | |
| No Photos choisies pour fin d'analyse: | | | | 20 | | |
| (Voir plus loin SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES) | | | | | | |

| DONNÉES EXPÉRIMENTALES | | | | | |
|---|----------------|----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| | | Lecture | Incertitude (±) | | |
| PRESSION ATMOSPHÉRIQUE (kPa) | | 102,6 | 0,3 | | |
| TEMPÉRATURE DU GAZ (°C) | | 22,0 | 0,1 | | |
| | | Format lecture | | Exprimé seulement en | |
| | | heure | min | s | min (±0,02) s (±1) |
| TEMPS TOTAL DE L'ESSAI (TTE) | | 18 | 29 | 18,48 | 1109 |
| TEMPS ÉCOULÉ POUR RÉGIME PERMANENT | | | | 30 | 0,50 30 |
| DURÉE TOTALE DU FILM | | 13 | 42 | 13,70 | 822 |
| TEMPS ÉCOULÉ NOTÉ AVANT DÉBUT DU FILM | | 4 | 50 | 4,83 | 290 |
| MOMENT DE FIN DE L'ESSAI SUR LE FILM | | 13 | 39 | 13,65 | 819 |
| TEMPS « RÉEL » AVANT LE DÉBUT DU FILM | | 4 | 50 | 4,83 | 290 |
| <i>(Ne s'applique pas à cet essai)</i> | | | | | |
| HEURE FILMÉE DE L'INJECTION DU TRACEUR | | | | inutile | inutile |
| MOMENT DE L'INJECTION SUR LE FILM | | | | | |
| TEMPS « RÉEL » ÉCOULÉ AVANT L'INJECTION | | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! | #VALEUR! |
| SECTION DÉBITS MESURÉS ET RATIO G/L EXPÉRIMENTAL | | | | | |
| VOLUME TOTAL D'EAU TRAITÉ | | Lu | Corrigé | | |
| | Unités | L | L | | |
| | | 197,1 | 256,0 | | |
| | Incertitude(±) | 0,1 | 0,4 | | |
| DÉBIT D'EAU MOYEN CALCULÉ | | Non corrigé | Corrigé | | |
| | unités | L/min | L/min | | |
| | | 10,66 | 13,85 | | |
| | incertitude(±) | 0,01 | 0,03 | | |

| DONNÉES DE PRESSION CORRIGÉES | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Manomètres | A | A.1 | B | C | D | F |
| Force | Ligne d'eau | Ligne d'eau | Gaz cumulé | ligne d'eau | ligne d'eau | ligne de gaz |
| Position | Entrée injecteur | sortie injecteur | colonne de contact secondaire | sortie du haut vers les réservoirs | sortie du bas vers les réservoirs | entrée injecteur |
| Unités | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) | (kPa) |
| | 299,37 | 46,04 | 32,75 | 21,20 | 47,61 | -57,16 |
| | 296,76 | 49,59 | 35,85 | 21,71 | 47,61 | -45,91 |
| | 296,76 | 49,59 | 36,37 | 21,30 | 47,97 | -45,91 |
| | 296,24 | 49,59 | 36,37 | 21,20 | 47,61 | -45,40 |
| Moyenne | 297 | 49 | 35 | 21,4 | 47,7 | -49 |
| Écart-type | 1 | 2 | 2 | 0,2 | 0,2 | 6 |
| SECTION ÉCHANTILLONAGE DE L'EAU D'ESSAI | | | | | | |
| MESURE DU pH DE L'EAU D'ESSAI INITIALE À TEMPÉRATURE PIÈCE | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | pH | | pH | | | |
| #1 | 7,82 | | 7,81 | | pH moyen | 7,82 |
| #2 | 7,81 | | 7,83 | | Écart-type | 0,01 |
| MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ (ϕ) FINALE ASSOCIÉE À L'EAU D'ESSAI DÉSOXYGÉNÉE | | | | | | |
| Note: Ces valeurs sont les mêmes pour chaque type d'essai d'une même répétition d'une expérience | | | | | | |
| Échantillon | Bas du réservoir | | Haut du réservoir | | | |
| | (μS) | T (°C) | (μS) | T (°C) | | |
| #1 | 418 | 22,7 | 417 | 22,7 | ϕ moyenne | 418 |
| #2 | 417 | 22,7 | 418 | 22,6 | Écart-type | 1 |
| | | | | | T moy (°C) | 22,7 |
| | | | | | Écart-type | 0,0 |
| SECTION OXYGÈNE DISSOUS, TEMPÉRATURE, pH ET CONDUCTIVITÉ MESURÉS (tiré du fichier) | | | | | | |
| Compteur | Temps écoulé de l'expérience | Temps écoulé du film | [O₂] dissous | Température de l'eau | pH | Annotations |
| | ($\pm 0,02$ min) | (± 1 s) | ($\pm 0,2$ mg/L) | ($\pm 0,3$ °C) | $\pm 0,01$ | |
| 1 | 4,83 | 0 | 7,21 | 23,2 | 8,07 | |
| 1 | 5,00 | 10 | 7,08 | 23,4 | 8,07 | |
| 1 | 5,17 | 20 | 7,00 | 23,5 | 8,07 | |
| 1 | 5,33 | 30 | 6,94 | 23,6 | 8,07 | |
| 1 | 5,50 | 40 | 6,91 | 23,6 | 8,07 | |
| 1 | 5,67 | 50 | 6,89 | 23,7 | 8,07 | |
| 1 | 5,83 | 60 | 6,88 | 23,7 | 8,07 | |
| 1 | 6,00 | 70 | 6,93 | 23,7 | 8,07 | |
| 1 | 6,17 | 80 | 6,95 | 23,7 | 8,07 | |

| | | | | | | |
|---|-------|-----|------|------|------|------------|
| 1 | 6,33 | 90 | 6,96 | 23,7 | 8,07 | |
| 1 | 6,50 | 100 | 6,96 | 23,7 | 8,07 | |
| 1 | 6,67 | 110 | 6,96 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 6,83 | 120 | 6,98 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 7,00 | 130 | 7,01 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 7,17 | 140 | 7,13 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 7,33 | 150 | 7,20 | 23,7 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 7,50 | 160 | 7,27 | 23,7 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 7,67 | 170 | 7,33 | 23,7 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 7,83 | 180 | 7,45 | 23,6 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 8,00 | 190 | 7,53 | 23,5 | 8,07 | |
| 1 | 8,17 | 200 | 7,57 | 23,4 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 8,33 | 210 | 7,36 | 23,6 | 8,07 | |
| 1 | 8,50 | 220 | 7,31 | 23,7 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 8,67 | 230 | 7,29 | 23,7 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 8,83 | 240 | 7,27 | 23,8 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 9,00 | 250 | 7,28 | 23,8 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 9,17 | 260 | 7,34 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 9,33 | 270 | 7,32 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 9,50 | 280 | 7,25 | 23,8 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 9,67 | 290 | 7,21 | 23,8 | 8,07 | Ajustement |
| 1 | 9,83 | 300 | 7,19 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,00 | 310 | 7,21 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,17 | 320 | 7,20 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,33 | 330 | 7,22 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,50 | 340 | 7,21 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,67 | 350 | 7,19 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 10,83 | 360 | 7,20 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 11,00 | 370 | 7,21 | 23,8 | 8,07 | |
| 1 | 11,17 | 380 | 7,23 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 11,33 | 390 | 7,21 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 11,50 | 400 | 7,25 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 11,67 | 410 | 7,21 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 11,83 | 420 | 7,23 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,00 | 430 | 7,29 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,17 | 440 | 7,32 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,33 | 450 | 7,32 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,50 | 460 | 7,37 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,67 | 470 | 7,41 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 12,83 | 480 | 7,42 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,00 | 490 | 7,42 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,17 | 500 | 7,43 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,33 | 510 | 7,45 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,50 | 520 | 7,45 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,67 | 530 | 7,49 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 13,83 | 540 | 7,46 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 14,00 | 550 | 7,47 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 14,17 | 560 | 7,46 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 14,33 | 570 | 7,48 | 23,9 | 8,07 | |
| 1 | 14,50 | 580 | 7,49 | 23,9 | 8,07 | |

| | | | | | |
|---|-------|------|------|------|-------------|
| 1 | 14,67 | 590 | 7,49 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 14,83 | 600 | 7,50 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,00 | 610 | 7,52 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,17 | 620 | 7,50 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,33 | 630 | 7,50 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,50 | 640 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,67 | 650 | 7,56 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 15,83 | 660 | 7,55 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,00 | 670 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,17 | 680 | 7,51 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,33 | 690 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,50 | 700 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,67 | 710 | 7,54 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 16,83 | 720 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,00 | 730 | 7,55 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,17 | 740 | 7,56 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,33 | 750 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,50 | 760 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,67 | 770 | 7,54 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 17,83 | 780 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 18,00 | 790 | 7,56 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 18,17 | 800 | 7,52 | 23,9 | 8,07 |
| 1 | 18,33 | 810 | 7,53 | 23,9 | 8,07 |
| | 18,50 | 820 | | | Arrêt essai |
| | 18,67 | 830 | | | |
| | 18,83 | 840 | | | |
| | 19,00 | 850 | | | |
| | 19,17 | 860 | | | |
| | 19,33 | 870 | | | |
| | 19,50 | 880 | | | |
| | 19,67 | 890 | | | |
| | 19,83 | 900 | | | |
| | 20,00 | 910 | | | |
| | 20,17 | 920 | | | |
| | 20,33 | 930 | | | |
| | 20,50 | 940 | | | |
| | 20,67 | 950 | | | |
| | 20,83 | 960 | | | |
| | 21,00 | 970 | | | |
| | 21,17 | 980 | | | |
| | 21,33 | 990 | | | |
| | 21,50 | 1000 | | | |
| | 21,67 | 1010 | | | |
| | 21,83 | 1020 | | | |
| | 22,00 | 1030 | | | |
| | 22,17 | 1040 | | | |
| | 22,33 | 1050 | | | |
| | 22,50 | 1060 | | | |
| | 22,67 | 1070 | | | |
| | 22,83 | 1080 | | | |

| | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|------|---------------------------------|---|-----------------|
| | 23,00 | 1090 | | | |
| | 23,17 | 1100 | | | |
| | 23,33 | 1110 | | | |
| | 23,50 | 1120 | | | |
| | 23,67 | 1130 | | | |
| | 23,83 | 1140 | | | |
| | 24,00 | 1150 | | | |
| | 24,17 | 1160 | | | |
| | 24,33 | 1170 | | | |
| | 24,50 | 1180 | | | |
| | 24,67 | 1190 | | | |
| | 24,83 | 1200 | | | |
| | 25,00 | 1210 | | | |
| | 25,17 | 1220 | | | |
| | 25,33 | 1230 | | | |
| | 25,50 | 1240 | | | |
| | 25,67 | 1250 | | | |
| | 25,83 | 1260 | | | |
| | 26,00 | 1270 | | | |
| | 26,17 | 1280 | | | |
| | 26,33 | 1290 | | | |
| | 26,50 | 1300 | | | |
| | 26,67 | 1310 | | | |
| | 26,83 | 1320 | | | |
| | 27,00 | 1330 | | | |
| | 27,17 | 1340 | | | |
| | 27,33 | 1350 | | | |
| | 27,50 | 1360 | | | |
| | 27,67 | 1370 | | | |
| | 27,83 | 1380 | | | |
| | 28,00 | 1390 | | | |
| | 28,17 | 1400 | | | |
| | 28,33 | 1410 | | | |
| | 28,50 | 1420 | | | |
| | 28,67 | 1430 | | | |
| | 28,83 | 1440 | | | |
| | 29,00 | 1450 | | | |
| | 29,17 | 1460 | | | |
| | 29,33 | 1470 | | | |
| | 29,50 | 1480 | | | |
| | 29,67 | 1490 | | | |
| | 29,83 | 1500 | | | |
| Nombre total de données | | | [O2] dissous moyenne | Température moyenne de l'eau | pH moyen |
| 82 | | | (mg/L) | (°C) | |
| | | | 7,3 | 23,8 | 8,07 |
| | Écart-type | | 0,2 | 0,1 | 0,00 |

| SECTION COMMENTAIRES OU OBSERVATIONS LORS DE L'ESSAI | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------|--------|--------------------------------|--------|
| Coup d'eau estimé vers les 6 min. Les deux valves situées sur la ligne d'eau des sondes ont été utilisées pour stabiliser l'équilibre de l'eau. | | | | | |
| Note concernant le traitement des photos pour les bulles. La hauteur du panache est considérée supérieure ou égale à celle estimée pour les précédentes expériences. Cependant, il faut se rappeler que la tendance observée est vers la diminution de la hauteur avec l'augmentation du débit de gaz. | | | | | |
| SECTION TRAITEMENT AVANCÉ DES DONNÉES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA TAILLE MOYENNE DES BULLES | | | | | |
| ESTIMATION DE LA HAUTEUR ET DE LA LARGEUR MOYENNE DU PANACHE DE BULLES | | | | | |
| DESCRIPTION QUALITATIVE DE LA DISTRIBUTION ET DE LA FORME DES BULLES | | | | | |
| Fichier des images traitées avec DraftSight: | | | | | |
| 1. Lien imalog | | 2. Sauvegarde | | | |
| Photos traitées CAM-HV\Réoxygénation\Exp#6_Réox_1_2_001_002_003_004_005.dwg | | | | | |
| Dimensions de référence dans les photos (valeur de correction en mm): | | | | | |
| | | | | RP | 5,0 |
| | | | | RT | 5,0 |
| Photos traitées | | | | | |
| | Configuration Panache de bulles | | | Configuration Taille de bulles | |
| Paramètres | RP | H | L | RT | T |
| Valeur estimée à l'aide du logiciel (unité logiciel) | 0,2726 | | 2,1047 | 0,6847 | 0,3253 |
| | 0,2795 | | 2,1208 | 0,7042 | 0,3450 |
| | 0,2795 | | 2,1369 | 0,6983 | 0,5389 |
| | | | | | 0,5191 |
| | | | | | 0,6872 |
| | | | | | 0,4134 |
| | | | | | 0,5218 |
| | | | | | 0,1192 |
| Moyenne | 0,277 | #DIV/0! | 2,121 | 0,696 | 0,434 |
| Écart-type | 0,004 | #DIV/0! | 0,016 | 0,010 | 0,173 |
| | | H | L | | T |
| Valeur réelle estimée (en mm) | | | 37,964 | | 2,338 |
| | | | 38,254 | | 2,479 |
| | | | 38,544 | | 3,873 |
| | | | | | 3,731 |
| | | | | | 4,939 |
| | | | | | 2,971 |
| | | | | | 3,750 |
| | | | | 0,857 | |
| Moyenne | | #DIV/0! | 38,3 | | 3 |
| Écart-type | | #DIV/0! | 0,3 | | 1 |

| Description qualitative des caractéristiques associées à la répartition et à la forme des bulles dans la colonne de contact secondaire: | |
|--|--|
| Distribution générale des bulles dans la colonne d'eau: | Au centre et d'un côté |
| Dans les zones occupées par des bulles: | |
| Taille moyenne des bulles observée | Petite |
| Distance moyenne des bulles prises deux à deux | Moyennement proche |
| Nombre de bulles par unité de surface photos | Petit |
| Forme générale des bulles observées | Grosse irrégulière et petite régulière |

ANNEXE VII

TRAITEMENT GRAPHIQUE DES PHOTOS

Voici un exemple simulé de traitement de photos prises à l'aide de la caméra haute-vitesse. Ceci donne un aperçu de la démarche réalisée dans le logiciel utilisé à cette fin afin de donner une grandeur physique réel aux différents traits appliqués.

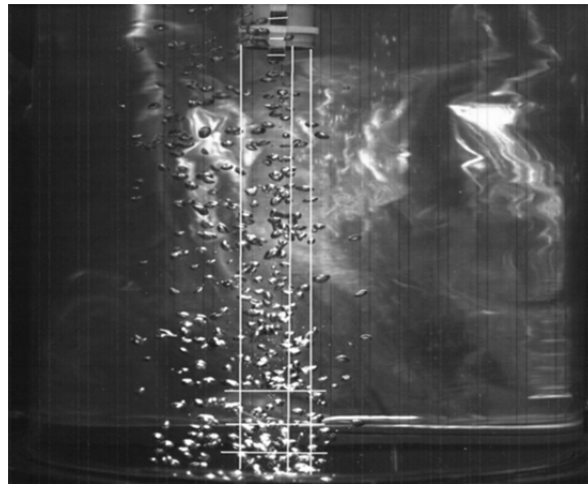


Figure-A VII-1 Exemple d'estimation des paramètres pour une photo de type «Panache de bulle»

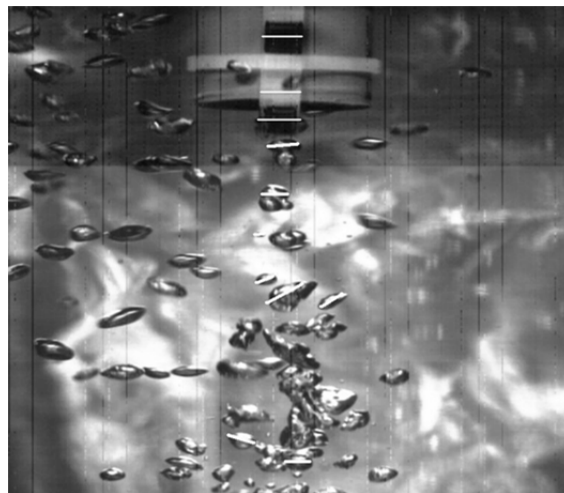


Figure-A VII-2 Exemple de d'estimation des paramètres pour les photos de type «Taille de bulle»

ANNEXE VIII

SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Ce grand tableau est divisé en sections successives en rappelant sur chaque page le nom des expériences pour en faciliter la présentation et la lecture. Les sections résument les principaux résultats générés par méta-analyse des données tirées des formulaires de chaque expérience. Beaucoup des graphiques présentés dans le chapitre 3 réfèrent à ces résultats.

Tableau-A VIII-1 Tableau synthèse des principaux résultats

| Section --> | | Températures | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|--------------------|--------|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Nombre de série d'essais traité | Température initiale de l'eau d'essai | Gain en température par traitement | | Température moyenne de l'eau d'essai | | Température du gaz | | |
| Unité --> | | °C | °C | | °C | | °C | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | | | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 4 | 23 | 1 | 0,5 | 0,2 | 24 | 1 | 0 | 0 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 3 | 22,4 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 24 | 1 | 21,6 | 0,3 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 3 | 22,4 | 0,2 | 0,5 | 0,2 | 24 | 1 | 21,6 | 0,3 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 3 | 22,5 | 0,9 | 0,5 | 0,1 | 24 | 1 | 21,6 | 0,2 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 3 | 22,4 | 0,7 | 0,6 | 0,2 | 24 | 1 | 21,9 | 0,7 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 3 | 22,7 | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 25 | 1 | 21,9 | 0,4 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 3 | 22,4 | 0,3 | 0,52 | 0,08 | 24 | 1 | 21,8 | 0,3 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c#a et d#b | 3 | 23 | 1 | 0,6 | 0,2 | 25 | 1 | 22,0 | 0,8 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 3 | 22,4 | 0,7 | 0,51 | 0,08 | 24 | 1 | 21,8 | 0,3 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 3 | 22,7 | 0,7 | 0,55 | 0,06 | 23,8 | 0,9 | 22,0 | 0,0 |
| Expérience 11- Mélanges statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 3 | 23 | 2 | 0,6 | 0,2 | 24 | 2 | 21,7 | 0,4 |
| Expérience 12- Mélanges statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 3 | 22,4 | 0,8 | 0,6 | 0,1 | 24 | 1 | 21,8 | 0,3 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 3 | 22 | 2 | 0,5 | 0,1 | 24 | 2 | 21,5 | 0,1 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 3 | 23 | 1 | 0,5 | 0,1 | 24 | 1 | 21,5 | 0,0 |

| Section --> | Propriétés du laboratoire et de l'eau d'essai | | | | | |
|--|---|-------------|--|-------------|----------------------------------|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Pression atmosphérique | | Variation de conductivité de l'eau d'essai | | Variation de pH de l'eau d'essai | |
| Unité --> | kPa | | µS | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 101,8 | 0,6 | 120 | 8 | 0,28 | 0,08 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 101,4 | 0,7 | 125 | 9 | 0,30 | 0,06 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 102,5 | 0,6 | 121 | 8 | 0,33 | 0,06 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 101,4 | 0,6 | 113 | 3 | 0,27 | 0,03 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 101,9 | 0,6 | 121 | 9 | 0,33 | 0,04 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 102,5 | 0,1 | 119 | 5 | 0,35 | 0,08 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 100,4 | 0,8 | 122 | 2 | 0,35 | 0,07 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 101,2 | 0,7 | 114 | 3 | 0,3 | 0,1 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 100,5 | 0,4 | 120 | 2 | 0,25 | 0,07 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 101,3 | 0,3 | 120 | 4 | 0,275 | 0,009 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 100 | 1 | 131 | 10 | 0,26 | 0,01 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 101,5 | 0,5 | 121 | 5 | 0,28 | 0,04 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 101,3 | 0,6 | 116 | 6 | 0,32 | 0,04 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 100 | 1 | 114 | 4 | 0,27 | 0,03 |

| Durée d'un essai; débits | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|
| Temps de traitement | | Volume d'eau traité | | Débit d'eau | | Débit d'air | | Ratio expérimental G/L | |
| min | | L | | (L/min) | | (L/min) | | (L/min/L/min) | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 18,2 | 0,1 | 257 | 2 | 13,96 | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18,1 | 0,2 | 256 | 4 | 13,95 | 0,02 | 0,011 | 0,001 | 0,00082 | 0,00008 |
| 18,1 | 0,1 | 255 | 2 | 13,96 | 0,04 | 0,0275 | 0,0001 | 0,00197 | 0,00001 |
| 18,3 | 0,2 | 257 | 2 | 13,90 | 0,03 | 0,11791 | 0,00005 | 0,00848 | 0,00002 |
| 18,3 | 0,2 | 254 | 3 | 13,79 | 0,05 | 0,2620 | 0,0007 | 0,0190 | 0,0001 |
| 18,8 | 0,4 | 259 | 6 | 13,64 | 0,03 | 1,12 | 0,04 | 0,082 | 0,003 |
| 19,6 | 0,8 | 263 | 10 | 13,30 | 0,03 | 3,97 | 0,04 | 0,298 | 0,003 |
| 26,9 | 0,9 | 259 | 11 | 9,53 | 0,03 | 0,784 | 0,006 | 0,0822 | 0,0006 |
| 19,1 | 0,7 | 263 | 9 | 13,63 | 0,02 | 0,71 | 0,02 | 0,052 | 0,002 |
| 19,6 | 0,1 | 258,8 | 0,6 | 13,08 | 0,05 | 1,06 | 0,02 | 0,081 | 0,001 |
| 22,0 | 0,2 | 258 | 2 | 11,59 | 0,06 | 0,93 | 0,02 | 0,080 | 0,002 |
| 22,4 | 0,1 | 260 | 1 | 11,39 | 0,05 | 1,11 | 0,01 | 0,097 | 0,001 |
| 19,1 | 0,7 | 262 | 8 | 13,59 | 0,03 | 1,09 | 0,01 | 0,0803 | 0,0006 |
| 18,8 | 0,2 | 258 | 3 | 13,61 | 0,03 | 1,104 | 0,005 | 0,0812 | 0,0004 |

| Section --> | Pressions ligne de gaz et ligne d'eau du pilote | | | |
|--|---|-------------|-------------------------------|-------------|
| | Pression entrée injecteur | | Pression eau sortie injecteur | |
| Variable d'intérêt --> | | | | |
| Unité --> | (kPa) | | (kPa) | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | Manomètre A | | Manomètre A.1 | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 296 | 1 | 44,2 | 0,9 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 294,6 | 0,9 | 44 | 1 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 296 | 1 | 44,9 | 0,9 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 295 | 1 | 44,2 | 0,9 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 297 | 1 | 45 | 2 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 297,9 | 0,8 | 47 | 2 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 298,7 | 0,8 | 49,8 | 0,6 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 136 | 1 | 33 | 2 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 296,0 | 0,8 | 100 | 1 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 301,0 | 0,8 | 97,8 | 0,4 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 309 | 2 | 158 | 3 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 313 | 2 | 159,7 | 0,6 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 296 | 2 | 47 | 2 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 296 | 1 | 44,6 | 0,8 |

| Pressions ligne de gaz et ligne d'eau du pilote | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|
| Pression eau sortie bas de colonne | | Pression eau sortie haut de colonne | | Pression gaz cumulé colonne | | Pression gaz entrée injecteur | |
| (kPa) | | (kPa) | | (kPa) | | (kPa) | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Manomètre D | | Manomètre C | | Manomètre B | | Manomètre F | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 42,9 | 0,8 | 17,5 | 0,6 | 31,2 | 0,8 | -85 | 8 |
| 42,4 | 0,9 | 17,3 | 0,9 | 31,2 | 0,9 | -91 | 4 |
| 43,6 | 0,8 | 17,8 | 0,8 | 32,5 | 0,9 | -91,4 | 0,8 |
| 42,5 | 0,7 | 17,4 | 0,4 | 31,6 | 0,6 | -83,8 | 0,8 |
| 44 | 2 | 18 | 2 | 33 | 1 | -73,9 | 0,6 |
| 45 | 2 | 19 | 2 | 34 | 2 | -49 | 2 |
| 46,1 | 0,8 | 22,1 | 0,6 | 35,5 | 0,9 | -4 | 1 |
| 31 | 1 | 7,5 | 0,6 | 20 | 1 | -19 | 1 |
| 43 | 2 | 19 | 2 | 32 | 2 | -28 | 3 |
| 41,7 | 0,9 | 17,5 | 0,9 | 31 | 1 | 6,8 | 0,9 |
| 37 | 1 | 13,7 | 0,7 | 24 | 1 | 76 | 3 |
| 37,6 | 0,4 | 13,8 | 0,4 | 25,3 | 0,5 | 85 | 1 |
| 44 | 2 | 21 | 2 | 34 | 2 | -50 | 3 |
| 43 | 1 | 19,6 | 0,6 | 30 | 1 | -50 | 2 |

| Pressions ligne de gaz et ligne d'eau du pilote | | | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| Chute de pression le long du circuit d'eau | | | | | | | | | |
| (kPa) | | | | | | | | | |
| Δ Système (A-Réservoir) | | | | | | | | | |
| Δ [Injecteur + Colonne](A-C) | | | | | | | | | |
| Δ Colonne(A.1-C) | | | | | | | | | |
| Δ Système (A-Réservoir) | | Δ Injecteur (A-A.1) | | Δ Contact primaire (A.1-D) | | Δ Contact secondaire (D-C) | | Δ Sortie (C-Réservoir) | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 296 | 1 | 251 | 2 | 1 | 1 | 25 | 1 | 17,5 | 0,6 |
| 294,6 | 0,9 | 251 | 2 | 1 | 2 | 25 | 1 | 17,3 | 0,9 |
| 296 | 1 | 251 | 1 | 1 | 1 | 26 | 1 | 17,8 | 0,8 |
| 295 | 1 | 251 | 1 | 2 | 1 | 25 | 0,8 | 17,4 | 0,4 |
| 297 | 1 | 251 | 2 | 2 | 2 | 26 | 3 | 17,6 | 2,0 |
| 297,9 | 0,8 | 251 | 2 | 2 | 3 | 26 | 3 | 19,2 | 2,1 |
| 298,7 | 0,8 | 249 | 1 | 4 | 1 | 24 | 1 | 22,1 | 0,6 |
| 136 | 1 | 104 | 2 | 2 | 2 | 24 | 1 | 7,5 | 0,6 |
| 296,0 | 0,8 | 196 | 2 | 57 | 2 | 24 | 2 | 19,5 | 1,7 |
| 301,0 | 0,8 | 203,1 | 0,9 | 56 | 1 | 24 | 1 | 17,5 | 0,9 |
| 309 | 2 | 151 | 4 | 122 | 3 | 23 | 1 | 13,7 | 0,7 |
| 313 | 2 | 153 | 2 | 122 | 1 | 24 | 0,5 | 13,8 | 0,4 |
| 296 | 2 | 249 | 3 | 3 | 3 | 24 | 3 | 20,7 | 1,8 |
| 296 | 1 | 252 | 2 | 2 | 1 | 23 | 1 | 19,6 | 0,6 |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | | | |
|--|---|-------------|-----------------|---|-------------|-----------------|
| Variable d'intérêt --> | Taux d'oxygène initial de l'eau d'essai | | | Taux d'oxygène mesuré après désoxygénation (niveau de désoxygénation) | | |
| Unité --> | mg/L _{eau} | | | mg/L _{eau} | | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Erreur relative | Valeur | Incertitude | Erreur relative |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 9,24 | 0,48 | 5,19 | 1,72 | 0,29 | 16,90 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 9,15 | 0,28 | 3,08 | 1,18 | 0,39 | 33,14 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 9,48 | 0,13 | 1,40 | 1,20 | 0,20 | 16,89 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 9,40 | 0,05 | 0,56 | 1,19 | 0,09 | 7,45 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 9,14 | 0,21 | 2,31 | 1,24 | 0,30 | 23,84 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 9,56 | 0,16 | 1,71 | 1,82 | 0,37 | 20,40 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 9,44 | 0,32 | 3,39 | 1,96 | 0,40 | 20,27 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c#a et d#b | 9,15 | 0,53 | 5,81 | 1,46 | 0,22 | 14,93 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 9,81 | 0,15 | 1,50 | 2,10 | 0,19 | 9,08 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 10,49 | 0,22 | 2,06 | 2,35 | 0,15 | 6,58 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 10,79 | 0,25 | 2,32 | 1,39 | 0,64 | 45,66 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 10,95 | 0,16 | 1,47 | 1,77 | 0,46 | 25,81 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 9,73 | 0,21 | 2,16 | 1,65 | 0,19 | 11,83 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 9,34 | 0,17 | 1,80 | 2,52 | 0,31 | 12,09 |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | |
|--|---|-------------|--|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Nombre(s) de traitement(s) pour resaturer l'eau d'essai | | Après resaturation, fraction du recouvrement de l'oxygène initialement retirée par litre d'eau d'essai | |
| Unité --> | | | (mg/L _{eau} / mg/L _{eau}) | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 4,8 | 0,5 | 0,94 | 0,03 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 5 | 0 | 0,92 | 0,02 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 4,7 | 0,6 | 0,90 | 0,01 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 4,3 | 0,6 | 0,89 | 0,02 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 4 | 0 | 0,93 | 0,01 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 3,7 | 0,6 | 0,94 | 0,02 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 2,7 | 1,2 | 0,97 | 0,01 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 4 | 0 | 0,95 | 0,04 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 3,7 | 0,6 | 0,96 | 0,01 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 3 | 0 | 0,95 | 0,01 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 3 | 0 | 0,96 | 0,02 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 2,3 | 0,6 | 0,957 | 0,007 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 2,7 | 0,6 | 0,87 | 0,03 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 3 | 0 | 0,91 | 0,03 |

| Performance de redissolution du gaz | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| La capacité à saturer (valeur absolue) | | Fraction recouvrée à chaque traitement de la quantité d'oxygène initiale restante pouvant être redissoute | | | | | | | | | |
| (mg/L _{eau} / mg/L _{eau}) | | (mg/L _{eau} / mg/L _{eau}) | | | | | | | | | |
| | | Traitements successifs | | | | | | | | | |
| | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 0,95 | 0,02 | 0,56 | 0,03 | 0,54 | 0,08 | 0,43 | 0,10 | 0,35 | 0,22 | 0,20 | 0,08 |
| 0,93 | 0,02 | 0,58 | 0,02 | 0,53 | 0,07 | 0,39 | 0,03 | 0,35 | 0,11 | 0,07 | 0,05 |
| 0,92 | 0,01 | 0,60 | 0,02 | 0,47 | 0,03 | 0,36 | 0,07 | 0,21 | 0,04 | 0,17 | 0,02 |
| 0,90 | 0,02 | 0,62 | 0,03 | 0,47 | 0,02 | 0,34 | 0,04 | 0,13 | 0,05 | | |
| 0,94 | 0,02 | 0,68 | 0,02 | 0,59 | 0,04 | 0,35 | 0,09 | 0,12 | 0,03 | | |
| 0,95 | 0,01 | 0,745 | 0,005 | 0,61 | 0,07 | 0,22 | 0,17 | 0,39 | 0,10 | | |
| 0,97 | 0,02 | 0,91 | 0,01 | 0,70 | 0,16 | | | | | | |
| 0,96 | 0,04 | 0,78 | 0,02 | 0,60 | 0,16 | 0,41 | 0,18 | | | | |
| 0,97 | 0,01 | 0,76 | 0,03 | 0,69 | 0,10 | 0,23 | 0,05 | 0,34 | 0,18 | | |
| 0,96 | 0,01 | 0,82 | 0,01 | 0,65 | 0,02 | 0,29 | 0,13 | | | | |
| 0,96 | 0,02 | 0,87 | 0,02 | 0,50 | 0,07 | 0,37 | 0,21 | | | | |
| 0,96 | 0,00 | 0,90 | 0,01 | 0,57 | 0,05 | | | | | | |
| 0,89 | 0,03 | 0,71 | 0,02 | 0,47 | 0,07 | 0,19 | 0,06 | | | | |
| 0,93 | 0,02 | 0,74 | 0,03 | 0,50 | 0,07 | 0,31 | 0,07 | | | | |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | |
|--|---|-------------|--------|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Masse d'oxygène redissoute à chaque traitement en mg/L d'eau traité et référée à la moyenne de l'oxygène retirée initialement de l'eau d'essai; soit $8,0 \pm 0,6$ mg/L | | | |
| Unité --> | mg/L _{eau} | | | |
| | | | | |
| | Traitements successifs | | | |
| | 1 | | 2 | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 4,47 | 0,6 | 1,88 | 0,6 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 4,66 | 0,6 | 1,75 | 0,6 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 4,78 | 0,6 | 1,51 | 0,6 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 4,99 | 0,6 | 1,41 | 0,6 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 5,44 | 0,6 | 1,51 | 0,6 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 5,96 | 0,6 | 1,25 | 0,6 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 7,25 | 0,6 | 0,51 | 0,6 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 6,24 | 0,6 | 1,04 | 0,6 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 6,11 | 0,6 | 1,29 | 0,6 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 6,55 | 0,6 | 0,94 | 0,6 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 6,98 | 0,6 | 0,50 | 0,6 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 7,17 | 0,6 | 0,47 | 0,6 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 5,68 | 0,6 | 1,08 | 0,6 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 5,95 | 0,6 | 1,0 | 0,6 |

| Performance de redissolution du gaz | | | | | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| Masse d'oxygène redissoute à chaque traitement en mg/L d'eau traité et référée à la moyenne de l'oxygène retirée initialement de l'eau d'essai; soit $8,0 \pm 0,6$ mg/L | | | | | |
| mg/L _{eau} | | | | | |
| | | | | | |
| Traitements successifs | | | | | |
| 3 | | 4 | | 5 | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 0,71 | 0,6 | 0,31 | 0,6 | 0,2 | 0,6 |
| 0,62 | 0,6 | 0,32 | 0,6 | 0,05 | 0,6 |
| 0,61 | 0,6 | 0,23 | 0,6 | 0,09 | 0,6 |
| 0,53 | 0,6 | 0,14 | 0,6 | | |
| 0,36 | 0,6 | 0,08 | 0,6 | | |
| 0,19 | 0,6 | 0,10 | 0,6 | | |
| | | | | | |
| 0,25 | 0,6 | 0,08 | 0,6 | | |
| 0,15 | 0,6 | 0,18 | 0,6 | | |
| 0,14 | 0,6 | | | | |
| 0,19 | 0,6 | | | | |
| | | | | | |
| 0,13 | 0,6 | | | | |
| 0,31 | 0,6 | | | | |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | | | |
|--|---|-------------|-----------------|--------|-------------|-----------------|
| Variable d'intérêt --> | Fraction recouvrée cumulée après le xième traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée de l'eau d'essai | | | | | |
| Unité --> | | | | | | |
| | | | | | | |
| | Traitements successifs | | | | | |
| | 1 | | | 2 | | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Erreur relative | Valeur | Incertitude | Erreur relative |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 0,56 | 0,03 | 5,4 | 0,79 | 0,05 | 6,3 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 0,58 | 0,02 | 3,2 | 0,80 | 0,04 | 4,5 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 0,60 | 0,02 | 2,5 | 0,79 | 0,01 | 0,7 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 0,62 | 0,03 | 4,5 | 0,80 | 0,02 | 2,8 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 0,68 | 0,02 | 3,1 | 0,87 | 0,02 | 2,2 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 0,745 | 0,005 | 0,7 | 0,90 | 0,02 | 1,9 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 0,91 | 0,01 | 1,5 | 0,97 | 0,02 | 1,8 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 0,78 | 0,02 | 3,1 | 0,91 | 0,04 | 4,7 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 0,76 | 0,03 | 3,6 | 0,92 | 0,03 | 3,4 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 0,82 | 0,01 | 1,4 | 0,936 | 0,008 | 0,8 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 0,87 | 0,02 | 1,8 | 0,94 | 0,01 | 1,6 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 0,90 | 0,01 | 1,2 | 0,95 | 0,01 | 1,0 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 0,71 | 0,02 | 3,5 | 0,85 | 0,03 | 3,1 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 0,74 | 0,03 | 3,4 | 0,87 | 0,03 | 3,4 |

| Performance de redissolution du gaz | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-----------------|--------|-------------|-----------------|--------|-------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Fraction recouvrée cumulée après le xième traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée de l'eau d'essai | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| Traitements successifs | | | | | | | | | Moyenne des erreurs relatives | Moyenne des incertitudes | |
| 3 | | | 4 | | | 5 | | | | | |
| Valeur | Incertitude | Erreur relative | Valeur | Incertitude | Erreur relative | Valeur | Incertitude | Erreur relative | | | |
| 0,88 | 0,04 | 4,0 | 0,92 | 0,04 | 4,4 | 0,93 | 0,02 | 2,2 | 4,45 | 0,035 | |
| 0,88 | 0,03 | 3,1 | 0,92 | 0,03 | 3,3 | 0,93 | 0,02 | 2,6 | 3,32 | 0,027 | |
| 0,86 | 0,01 | 1,4 | 0,891 | 0,004 | 0,5 | 0,90 | 0,01 | 1,7 | 1,35 | 0,010 | |
| 0,87 | 0,02 | 2,6 | 0,88 | 0,02 | 2,3 | | | | 3,05 | 0,023 | |
| 0,91 | 0,02 | 2,0 | 0,93 | 0,01 | 1,6 | | | | 2,21 | 0,018 | |
| 0,92 | 0,01 | 0,7 | 0,94 | 0,03 | 3,0 | | | | 1,57 | 0,014 | |
| | | | | | | | | | 1,69 | 0,016 | |
| 0,94 | 0,04 | 3,9 | 0,95 | 0,04 | 4,3 | | | | 3,99 | 0,036 | |
| 0,94 | 0,02 | 2,2 | 0,95 | 0,02 | 1,7 | | | | 2,75 | 0,024 | |
| 0,95 | 0,01 | 1,4 | | | | | | | 1,20 | 0,011 | |
| 0,96 | 0,02 | 1,8 | | | | | | | 1,74 | 0,016 | |
| | | | | | | | | | 1,14 | 0,011 | |
| 0,86 | 0,03 | 4,0 | | | | | | | 3,52 | 0,028 | |
| 0,91 | 0,03 | 3,2 | | | | | | | 3,34 | 0,028 | |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | |
|--|--|-------------|--------|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Fraction recouvrée après le xième traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée de l'eau d'essai; mais dû à l'apport en gaz seulement; bref en éliminant le bruit de fond (exp. #1) | | | |
| Unité --> | (mg/L _{eau} / mg/L _{eau}) | | | |
| | Traitements successifs | | | |
| | 1 | | 2 | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,05 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,04 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 0,04 | 0,02 | -0,01 | 0,01 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,02 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 0,12 | 0,02 | 0,08 | 0,02 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 0,19 | 0,00 | 0,11 | 0,02 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 0,35 | 0,01 | 0,18 | 0,02 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 0,22 | 0,02 | 0,12 | 0,04 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 0,20 | 0,03 | 0,13 | 0,03 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 0,26 | 0,01 | 0,14 | 0,01 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 0,31 | 0,02 | 0,14 | 0,01 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 0,34 | 0,01 | 0,16 | 0,01 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 0,15 | 0,02 | 0,05 | 0,03 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 0,18 | 0,03 | 0,08 | 0,03 |

| Performance de redissolution du gaz | | | | | |
|--|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| Fraction recouvrée après le xième traitement de la quantité d'oxygène initialement retirée de l'eau d'essai; mais dû à l'apport en gaz seulement; bref en éliminant le bruit de fond (exp. #1) | | | | | |
| (mg/L _{eau} / mg/L _{eau}) | | | | | |
| Traitements successifs | | | | | |
| 3 | | 4 | | 5 | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,02 |
| 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,02 |
| -0,02 | 0,01 | -0,03 | 0,00 | -0,02 | 0,01 |
| -0,02 | 0,02 | -0,04 | 0,02 | | |
| 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | | |
| 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | | |
| | | | | | |
| 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | | |
| 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | | |
| 0,07 | 0,01 | | | | |
| 0,08 | 0,02 | | | | |
| | | | | | |
| -0,02 | 0,03 | | | | |
| 0,03 | 0,03 | | | | |

| Section --> | Performance de redissolution du gaz | | | |
|--|---|-------------|--------|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Évolution de l'efficacité de transfert de la masse de gaz ajouté après le xième traitement successif de réoxygénation | | | |
| Unité --> | | | | |
| | Traitements successifs | | | |
| | 1 | | 2 | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 0,0 | | 0,0 | |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 1,7 | 1,3 | 0,5 | 2,6 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 1,1 | 0,4 | -0,2 | 0,2 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 0,4 | 0,2 | 0,04 | 0,15 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 0,38 | 0,06 | 0,23 | 0,06 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 0,132 | 0,003 | 0,08 | 0,01 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 0,068 | 0,003 | 0,034 | 0,004 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 0,16 | 0,02 | 0,08 | 0,03 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 0,23 | 0,03 | 0,15 | 0,04 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | 0,19 | 0,01 | 0,103 | 0,006 |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 0,23 | 0,01 | 0,10 | 0,01 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 0,20 | 0,01 | 0,097 | 0,006 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 0,11 | 0,02 | 0,04 | 0,02 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 0,13 | 0,02 | 0,05 | 0,02 |

| Performance de redissolution du gaz | | | | | |
|--|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| (Masse d'O2 dissous dû au gaz ou Masse d'O2 perdu (valeur négative) par rapport au bruit de fond(mg/L)/ Masse O2 totale disponible dans le gaz ajouté(mg/L)) | | | | | |
| Traitements successifs | | | | | |
| 3 | | 4 | | 5 | |
| Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | |
| -0,4 | 1,9 | -0,2 | 2,1 | -0,03 | 1,69 |
| -0,6 | 0,4 | -0,9 | 0,1 | -0,70 | 0,44 |
| -0,1 | 0,2 | -0,3 | 0,1 | | |
| 0,10 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | | |
| 0,029 | 0,005 | 0,01 | 0,02 | | |
| | | | | | |
| 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | | |
| 0,07 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | | |
| 0,051 | 0,009 | | | | |
| 0,06 | 0,01 | | | | |
| | | | | | |
| -0,02 | 0,03 | | | | |
| 0,02 | 0,02 | | | | |

| Section --> | Temps de résidence et performance de mélange | | | | | | | |
|--|--|-------------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Temps de résidence moyen ($t_{R_{moy}}$) | | Variation de conductivité maximale ($\Delta\phi_{max_{moy}}$) | | Critère de linéarité $\approx f / Aire \Delta_{moy}$ | | Débit d'eau moyen pour l'essai Temps de résidence seulement | |
| Unité --> | (min) | | (μs) | | | | (L/min) | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | | | | | | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | 7,8 | 2 | 92 | 36 | 0,33 | 0,08 | 13,94 | 0,03 |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 6,4 | 0,6 | 63 | 8 | 0,42 | 0,05 | 13,94 | 0,02 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 8,2 | 4 | 63 | 5 | 0,39 | 0,03 | 13,99 | 0,05 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 8,1 | 0,9 | 62 | 1 | 0,41 | 0,03 | 13,90 | 0,03 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 6,4 | 0,8 | 64 | 13 | 0,42 | 0,06 | 13,81 | 0,02 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 8,9 | 3 | 97 | 38 | 0,3 | 0,1 | 13,63 | 0,04 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 8,2 | 2 | 65 | 16 | 0,4 | 0,2 | 13,32 | 0,02 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 8,3 | 0,6 | 101 | 11 | 0,27 | 0,02 | 9,54 | 0,03 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | 6,8 | 0,8 | 35 | 5 | 0,7 | 0,2 | 13,63 | 0,03 |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | | | | | | | | |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | 6,09 | 0,01 | 26 | 6 | 0,75 | 0,05 | 11,61 | 0,08 |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | 7,6 | 0,8 | 38 | 5 | 0,68 | 0,04 | 11,36 | 0,02 |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | 7,6 | 1 | 90 | 11 | 0,31 | 0,06 | 13,60 | 0,02 |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | 9,7 | 2 | 101 | 4 | 0,24 | 0,05 | 13,59 | 0,03 |


| Section --> | Caméra haute-vitesse: caractérisation des bulles et du jet de bulles | |
|--|--|-------------|
| Variable d'intérêt --> | Tailles des bulles observées (diamètre idéalisé) | |
| Unité --> | (mm) | |
| Moyenne par expérience --> | Valeur | Incertitude |
| NOM DE L'EXPÉRIENCE | | |
| Expérience 1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0 | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 2- Référence jet libre G/L= 0,0008 | 0,6 | 0,1 |
| Expérience 3- Référence jet libre G/L= 0,002 | 0,7 | 0,1 |
| Expérience 4- Référence jet libre G/L= 0,008 | 1,4 | 0,2 |
| Expérience 5- Référence jet libre G/L= 0,02 | 2,0 | 0,2 |
| Expérience 6- Référence jet libre G/L= 0,08 = a/b | 3,3 | 0,3 |
| Expérience 7- Référence jet libre G/L= 0,3 | 5,5 | 0,9 |
| Expérience 8- Référence jet libre G/L= 0,08 = c/d; c≠a et d≠b | 4,9 | 0,3 |
| Expérience 9- Buse à G/L= 0,05 | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 10- Buse à G/L= 0,08 | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 11- Mélangeurs statiques G/L= 0,08; 2e méthode d'injection | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 12- Mélangeurs statiques G/L= 0,098; 2e méthode d'injection | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 13- Anneaux de Rachig G/L= 0,08 | #DIV/0! | #DIV/0! |
| Expérience 14- LTCP G/L= 0,08 | #DIV/0! | #DIV/0! |

ANNEXE IX


CARACTÉRISTIQUES DE L'EAU D'ESSAI

Rapport annuel de 2010 de la ville de Montréal à titre d'exemple concernant les caractéristiques de l'eau potable utilisée comme eau d'essai.


| Montréal Division de l'expertise technique | QUALITÉ DE L'EAU POTABLE PRODUITE PAR LES USINES ATWATER ET CHARLES-J.-DES-BAILLETS ET DISTRIBUÉE EN RÉSEAU | | 2010 | | |
|---|---|--|--------------------------------------|----------|----------|
| PARAMÈTRES | RECOMMANDATIONS SANTÉ CANADA (2008) | RÈGLEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE (Q-2,r.18.1.1) | EAU POTABLE CONCENTRATION | | |
| | | | MIN. | MOY. | MAX |
| CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES | | | | | |
| Conductivité sp. (µS/cm)** | - | - | 281 | 300 | 317 |
| Couleur (U.C.V.)** | ≤ 15 ¹ | - | 1 | 1 | 3 |
| Indice d'agressivité pH+log(alc*dt)** | - | - | 11,5 | 11,8 | 12,1 |
| Indice de Ryznar (2pHs-pH)** | - | - | 8,0 | 8,8 | 9,5 |
| Indice de saturation Langelier (pH-pHs)** | - | - | -0,91 | -0,49 | 0,47 |
| pH | 6,5-8,5 | 6,5-8,5 | 7,2 | 7,5 | 7,9 |
| Solides fixes (mg/L)** | - | - | 135 | 142 | 149 |
| Solides totaux (mg/L)** | ≤ 500 ¹ | - | 164 | 177 | 188 |
| Température (°C)** | - | - | -1 | 11 | 25,8 |
| Turbidité (U.T.N.) | ≤ 1 ⁵ | ≤ 5 / ≤ 1 ² | 0,08 | 0,21 | 0,60 |
| CARACTÉRISTIQUES BACTÉRIOLOGIQUES | | | | | |
| | | | MOYENNE ANNUELLE (5072 échantillons) | | |
| Coliformes totaux (PRE ou ABS/100mL) | > 90 % ABS ⁴ | > 90 % ABS ⁴ | 99,7 % ABS ⁴ | | |
| E.coli (PRE ou ABS/100mL) | ABS ⁴ | < 1 ou ABS ⁴ | 100 % ABS ⁴ | | |
| BHAA (U.F.C/mL) | - | - | < 1,05 (moyenne géométrique) | | |
| CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES INORGANIQUES ET ORGANIQUES (mg/l) | | | | | |
| | | | MIN | MOY | MAX |
| Antimoine (Sb) | ≤ 0,006 | ≤ 0,006 | 0,00011 | 0,00012 | 0,00012 |
| Alcalinité (éq.CaCO ₃)** | - | - | 81 | 87 | 91 |
| Aluminium (Al) ** | ≤ 0,1 | - | 0,00225 | 0,00717 | 0,02246 |
| Argent (Ag) ** | - | - | <0,00004 | <0,00004 | <0,00004 |
| Arsenic (As) | ≤ 0,01 | ≤ 0,025 | 0,00093 | 0,00096 | 0,00098 |
| Baryum (Ba) | ≤ 1 | ≤ 1,0 | 0,01933 | 0,01954 | 0,01975 |
| Bore (B) | ≤ 5 | ≤ 5 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Bromates (BrO ₃)* | ≤ 0,01 | ≤ 0,010 | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 |
| Cadmium (Cd) | ≤ 0,005 | ≤ 0,005 | <0,00003 | <0,00003 | <0,00003 |
| Calcium (Ca) ** | - | - | 27,89 | 30,74 | 32,93 |
| Carbone organique total** | - | - | 1,58 | 2,16 | 2,92 |
| Chlorures (Cl)** | ≤ 250 ¹ | - | 22,5 | 23,52 | 24,59 |
| Chrome total (Cr) | ≤ 0,05 | ≤ 0,05 | 0,0012 | 0,0014 | 0,0015 |
| Cobalt (Co) ** | - | - | <0,00003 | 0,00004 | 0,00006 |
| Cuivre (Cu) | ≤ 1,0 ¹ | ≤ 1,0 | 0,0790 | 0,1103 | 0,1415 |
| Cyanures (CN) | ≤ 0,2 | ≤ 0,2 | <0,004 | <0,004 | <0,004 |
| Dureté totale (CaCO ₃)** | - | - | 111 | 119 | 123 |
| Fer (Fe) ** | ≤ 0,3 ¹ | - | <0,00548 | 0,01100 | 0,02875 |
| Fluorures (F) | ≤ 1,5 | ≤ 1,5 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| Magnésium (Mg) ** | - | - | 7,05 | 7,89 | 8,78 |
| Manganèse (Mn) ** | ≤ 0,05 ¹ | - | 0,00005 | 0,00023 | 0,00067 |
| Mercure (Hg) | ≤ 0,001 | ≤ 0,001 | <0,00004 | <0,00004 | <0,00004 |
| Nickel (Ni) ** | - | - | 0,00041 | 0,00065 | 0,00088 |
| Nitrites + nitrates (N) | ≤ 45 | ≤ 10 | 0,22 | 0,32 | 0,41 |
| Phosphates totaux (P)** | - | - | <0,006 | <0,006 | 0,006 |
| Plomb (Pb) | ≤ 0,01 | ≤ 0,010 | 0,00088 | 0,00004 | 0,00101 |
| Potassium (K) ** | - | - | 1,30 | 1,48 | 1,58 |
| Sélénium (Se) | ≤ 0,01 | ≤ 0,010 | 0,0006 | 0,0006 | 0,0006 |
| Silice (SiO ₂)** | - | - | 0,44 | 0,89 | 1,22 |
| Sodium (Na) ** | ≤ 200 ¹ | - | 10,93 | 12,04 | 13,21 |
| Sulfates (SO ₄)** | ≤ 500 ¹ | - | 23,26 | 24,21 | 25,03 |
| Uranium (U) | ≤ 0,02 | ≤ 0,020 | 0,00030 | 0,00030 | 0,00030 |
| Zinc (Zn) ** | ≤ 5,0 ¹ | - | <0,00044 | 0,00105 | 0,00298 |

| | | |
|---|---|-------------|
| Montréal  Division de l'expertise technique | QUALITÉ DE L'EAU POTABLE PRODUITE PAR LES USINES ATWATER ET CHARLES-J.-DES-BAILLETS ET DISTRIBUÉE EN RÉSEAU | 2010 |
| | | |

| PARAMÈTRES | RECOMMANDATIONS SANTÉ CANADA | RÈGLEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE (Q-2,r.18.1.1) | EAU POTABLE MONTREAL | |
|--|---------------------------------|--|-------------------------|------------------------|
| | | | MAXIMUM MESURÉ | LIMITE DE DÉTECTION |
| SUBSTANCES ORGANIQUES | | | | |
| CARBAMATES (µg/L) | | | | |
| Bendiocarbe* | ≤ 40 | ≤ 40 | N.D. | 0,2 |
| Carbaryl* | ≤ 90 | ≤ 90 | N.D. | 0,2 |
| Carbofurane* | ≤ 90 | ≤ 90 | N.D. | 0,2 |
| COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS (µg/L) | | | | |
| 1,1,1,2-Tétrachloroéthane | - | - | N.D. | 0,08 |
| 1,1,1-Trichloroéthane | - | - | N.D. | 0,05 |
| 1,1,2,2-Tétrachloroéthane | - | - | N.D. | 0,06 |
| 1,1,2-Trichloroéthane | - | - | N.D. | 0,05 |
| 1,1-Dichloroéthane | - | - | N.D. | 0,06 |
| 1,1-Dichloroéthylène | ≤ 14 | ≤ 14 | N.D. | 0,07 |
| 1,1-Dichloropropène | - | - | N.D. | 0,06 |
| 1,2,3-Trichlorobenzène | - | - | D. | 0,04 |
| 1,2,3-Trichloropropane | - | - | N.D. | 0,09 |
| 1,2,4-Trichlorobenzène | - | - | D. | 0,04 |
| 1,2,4-Triméthylbenzène | - | - | N.D. | 0,04 |
| 1,2-Dibromo-3-chloropropane | - | - | N.D. | 0,24 |
| 1,2-Dibromoéthane | - | - | N.D. | 0,04 |
| 1,2-Dichlorobenzène | ≤ 200 | ≤ 200 | N.D. | 0,07 |
| 1,2-Dichloroéthane | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,05 |
| 1,2-Dichloropropane | - | - | N.D. | 0,06 |
| 1,3,5-Triméthylbenzène | - | - | N.D. | 0,02 |
| 1,3-Dichlorobenzène | - | - | N.D. | 0,06 |
| 1,3-Dichloropropane | - | - | N.D. | 0,02 |
| 1,4-Dichlorobenzène | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,05 |
| 1-Chlorobutane | - | - | N.D. | 0,08 |
| 1-Propène,3-chloro | - | - | N.D. | 0,20 |
| 2,2-Dichloropropane | - | - | N.D. | 0,06 |
| 2-Butanone | - | - | N.D. | 0,22 |
| 2-Chlorotoluène | - | - | N.D. | 0,06 |
| 2-Nitropropane | - | - | N.D. | 0,31 |
| 4-Chlorotoluène | - | - | N.D. | 0,04 |
| 4-Isopropyltoluène | - | - | N.D. | 0,03 |
| Acrylonitrile | - | - | N.D. | 0,13 |
| Benzène | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,05 |
| Bromobenzène | - | - | N.D. | 0,05 |
| Bromochlorométhane | - | - | N.D. | 0,07 |
| Bromoforme | - | Voir note 3 | 1,0 | 0,09 |
| Bromodichlorométhane | - | Voir note 3 | 12,5 | 0,04 |
| Bromométhane | - | - | N.D. | 0,15 |
| Chloroacétonitrile | - | - | N.D. | 1,38 |
| Chlorobenzène | ≤ 80 | ≤ 80 | N.D. | 0,05 |
| Chlorodibromométhane | - | Voir note 3 | 6,4 | 0,04 |
| Chloroéthane | - | - | N.D. | 0,19 |
| Chloroforme | - | Voir note 3 | 35,8 | 0,05 |
| Chlorométhane | - | - | N.D. | 0,08 |
| Chlorure de vinyle | ≤ 2 | ≤ 2 | N.D. | 0,07 |

| | | |
|---|---|------|
| Montréal  Division de l'expertise technique | QUALITÉ DE L'EAU POTABLE PRODUITE PAR LES USINES ATWATER ET CHARLES-J.-DES-BAILLETS ET DISTRIBUÉE EN RÉSEAU | 2010 |
|---|---|------|

| PARAMÈTRES | RECOMMANDATIONS SANTÉ CANADA | RÈGLEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE (Q-2,r.18.1.1) | EAU POTABLE | |
|--------------------------------|---------------------------------|--|-------------------|------------------------|
| | | | MAXIMUM MESURÉ | LIMITE DE DÉTECTION |
| cis-1,2-Dichloroéthylène | - | - | N.D. | 0,07 |
| cis-1,3-Dichloropropène | - | - | N.D. | 0,11 |
| Dibromométhane | - | - | N.D. | 0,06 |
| Dichlorodifluorométhane | - | - | N.D. | 0,08 |
| Dichlorométhane | ≤ 50 | ≤ 50 | N.D. | 0,09 |
| Diéthyléther | - | - | N.D. | 0,07 |
| Disulfure de carbone | - | - | D. | 0,08 |
| Ethylbenzène | ≤ 2,4 ¹ | - | N.D. | 0,03 |
| Hexachlorobutadiène | - | - | N.D. | 0,08 |
| Hexachloroéthane | - | - | N.D. | 0,14 |
| Isopropylbenzène | - | - | N.D. | 0,03 |
| Méthacrylonitrile | - | - | N.D. | 0,12 |
| Méthyl acrylate | - | - | N.D. | 0,10 |
| Méthyl méthacrylate | - | - | N.D. | 0,19 |
| MTBE(méthyl tert-butyl éther) | - | - | N.D. | 0,05 |
| m-Xylène + p-Xylène + o-Xylène | ≤ 300 ¹ | - | D. | 0,09 |
| Naphtalène | - | - | D. | 0,11 |
| n-Butylbenzène | - | - | N.D. | 0,04 |
| n-Propylbenzène | - | - | N.D. | 0,04 |
| Propionitrile | - | - | N.D. | 0,27 |
| sec-Butylbenzène | - | - | N.D. | 0,10 |
| Styrène | - | - | N.D. | 0,07 |
| tert-Butylbenzène | - | - | N.D. | 0,10 |
| Tétrachloroéthylène | ≤ 30 | ≤ 30 | N.D. | 0,05 |
| Tétrachlorure de carbone | 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,07 |
| Tétrahydrofurane | - | - | N.D. | 0,46 |
| Toluène | ≤ 24 ¹ | - | 0,3 | 0,03 |
| trans-1,2-Dichloroéthylène | - | - | N.D. | 0,06 |
| trans-1,3-Dichloropropène | - | - | N.D. | 0,10 |
| Trans-1,4-dichloro-2-butène | - | - | N.D. | 0,14 |
| Trichloroéthylène | ≤ 5 | ≤ 50 | N.D. | 0,06 |
| Trichlorofluorométhane | - | - | N.D. | 0,12 |
| Trihalométhanes totaux | ≤ 100 | ≤ 80 ³ | 50.1 ⁶ | 0,22 |
| COMPOSÉS PHÉNOLIQUES (µg/L) | | | | |
| 2,3,4,6-Tétrachlorophénol * | ≤ 100 | ≤ 100 | N.D. | 0,4 |
| 2,4 -Dichlorophénol * | ≤ 900 | ≤ 900 | N.D. | 0,6 |
| 2,4,6-Trichlorophénol * | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,4 |
| Pentachlorophénol * | ≤ 60 | ≤ 60 | N.D. | 0,4 |
| GLYPHOSATE (µg/L) | | | | |
| Glyphosate* | ≤ 280 | ≤ 280 | N.D. | 10 |
| HAP (µg/L) | | | | |
| Benzo(a)pyrène * | ≤ 0,01 | ≤ 0,01 | N.D. | 0,003 |
| HERBICIDES (µg/L) | | | | |
| Atrazine et métabolites* | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,3 |
| Cyanazine* | ≤ 10 | ≤ 10 | N.D. | 0,2 |
| Métribuzine* | ≤ 80 | ≤ 80 | N.D. | 0,2 |
| Simazine* | ≤ 10 | ≤ 10 | N.D. | 0,2 |

| | | |
|---|---|-------------|
| Montréal  Division de l'expertise technique | QUALITÉ DE L'EAU POTABLE PRODUITE PAR LES USINES ATWATER ET CHARLES-J.-DES-BAILLETS ET DISTRIBUÉE EN RÉSEAU | 2010 |
|---|---|-------------|

| PARAMÈTRES | RECOMMANDATIONS SANTÉ CANADA | RÈGLEMENT SUR LA QUALITÉ DE L'EAU POTABLE (Q-2,r.18.1.1) | EAU POTABLE MONTREAL | |
|---|---------------------------------|---|-------------------------|------------------------|
| | | | MAXIMUM MESURÉ | LIMITE DE DÉTECTION |
| PESTICIDES DE TYPE CHLOROPHÉNOXY CARBOXYLIQUE ET TRICHLOROACÉTATE (µg/L) | | | | |
| 2,4-D* | ≤ 100 | ≤ 100 | N.D. | 0,03 |
| Dicamba* | ≤ 120 | ≤ 120 | N.D. | 0,6 |
| Dinosébe* | ≤ 10 | ≤ 10 | N.D. | 0,4 |
| Piclorame* | ≤ 190 | ≤ 190 | N.D. | 0,06 |
| PESTICIDES ORGANOCHLORÉS (µg/L) | | | | |
| Métolachlore* | ≤ 50 | ≤ 50 | N.D. | 0,2 |
| Méthoxychlore * | ≤ 900 | ≤ 900 | N.D. | 0,03 |
| Trifluraline* | ≤ 45 | ≤ 45 | N.D. | 0,2 |
| PESTICIDES ORGANOPHOSPHORÉS (µg/L) | | | | |
| Azinphos méthyle* | ≤ 20 | ≤ 20 | N.D. | 0,3 |
| Chlorpyrifos* | ≤ 90 | ≤ 90 | N.D. | 0,2 |
| Diazinon * | ≤ 20 | ≤ 20 | N.D. | 0,2 |
| Diméthoate* | ≤ 20 | ≤ 20 | N.D. | 0,2 |
| Diuron* | ≤ 150 | ≤ 150 | N.D. | 0,3 |
| Malathion* | ≤ 190 | ≤ 190 | N.D. | 0,2 |
| Parathion * | ≤ 50 | ≤ 50 | N.D. | 0,2 |
| Phorate* | ≤ 2 | ≤ 2 | N.D. | 0,2 |
| Terbufos* | ≤ 1 | ≤ 1 | N.D. | 0,2 |
| AUTRES (µg/L) | | | | |
| Acide nitrilotriacétique | ≤ 400 | ≤ 400 | N.D. | 25 |
| Bromoxynil* | ≤ 5 | ≤ 5 | N.D. | 0,4 |
| Diclofop-méthyle* | ≤ 9 | ≤ 9 | N.D. | 0,2 |
| Diquat * | ≤ 70 | ≤ 70 | N.D. | 15 |
| Paraquat * (en dichlorures) | ≤ 10 | ≤ 10 | N.D. | 0,60 |

* : Échantillon dans le réseau; analysé en sous-traitance
 ** : Échantillon à la sortie des usines
 N.D. : Non détecté
 D. : Détecté, mais non quantifiable

Notes :

- 1 Objectif de qualité esthétique ou organoleptique
- 2 La turbidité doit être inférieure ou égale à 5 UTN, et ne doit pas dépasser 1,0 UTN dans plus de 5% des mesures au cours d'une période de 30 jours
- 3 La concentration moyenne annuelle des trihalométhanes totaux (chloroforme, bromodichlorométhane, chlorodibromométhane et bromoforme) ne doit pas excéder 80 µg/L (ces mesures sont prises en extrémité de réseau)
- 4 ABS = absence
- 5 Objectif de qualité pour la santé
- 6 Valeur maximale obtenue à un point d'échantillonnage

ANNEXE X

MÉTHODE DE CALCUL POUR ÉVALUER LA CONTRIBUTION DU BRUIT DE FOND À CHAQUE UNITÉ DE TRAITEMENT

La figure suivante modélise le taux de dissolution en oxygène de l'expérience du bruit de fond en fonction de la quantité d'oxygène ayant été retiré de l'eau d'essai.

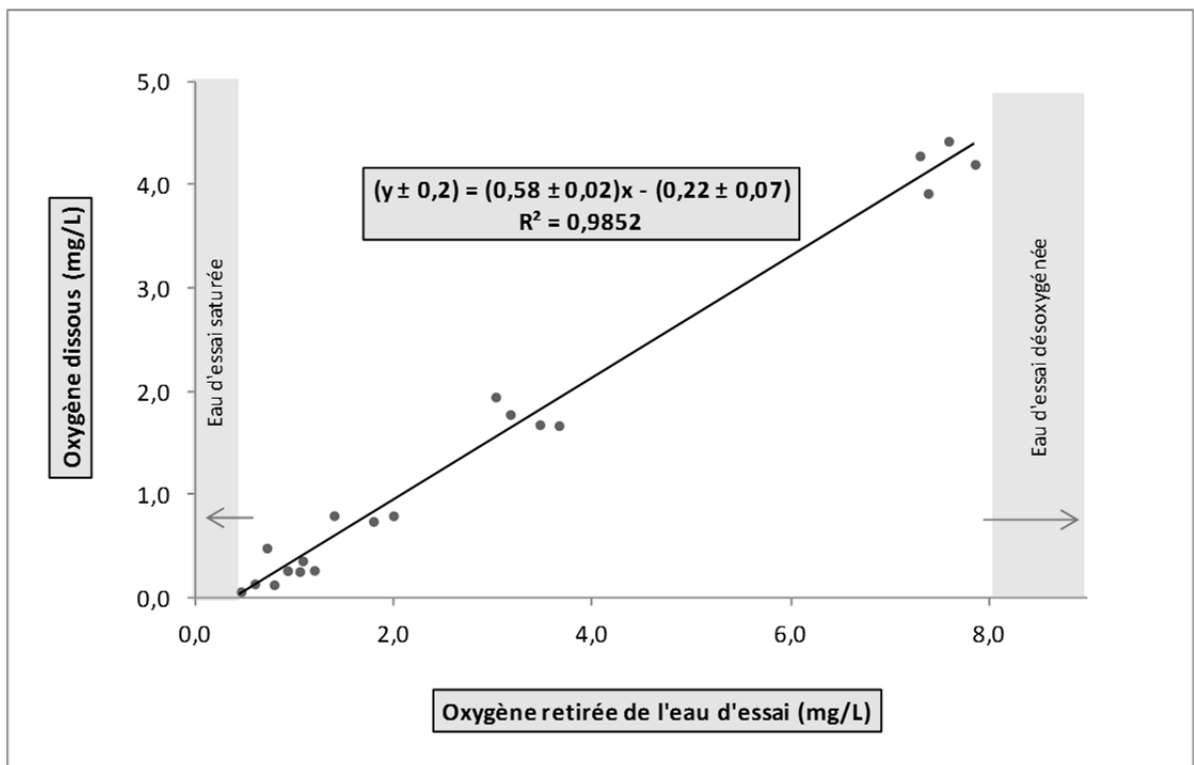


Figure-A X-1 Régression linéaire de la variation du taux de dissolution en fonction du taux de désoxygénation observé pour l'expérience #1- Acquisition du bruit de fond G/L = 0

Dans l'équation de régression linéaire obtenue, la variable y correspond au taux d'oxygène que l'expérience devrait dissoudre et la variable x représente la quantité d'oxygène retiré de l'eau d'essai ou si préféré le taux de désoxygénation initiale ou encore, l'oxygène pouvant être dissoute lors du traitement. Concernant l'aspect linéaire des données produites, il faut noter que le coefficient de corrélation n'est pas particulièrement «fort» à 0,9852. Voici un exemple ne tenant pas compte des incertitudes mais tenant compte des chiffres significatifs

dans les calculs. Pour établir au deuxième traitement de l'expérience #6, l'apport en oxygène attribuable seulement au bruit de fond durant ce traitement. Pour ce faire, il s'agit de connaître la quantité de l'oxygène retirée restante après le premier traitement. Cette masse restante est équivalente à l'oxygène qui aurait été retirée de l'eau pour ce traitement. Il s'agit de prendre la fraction recouvrée après le premier traitement de 0,745 et de la déduire de la masse d'oxygène retirée initialement établi à 8,0 mg/L. Ceci donne $(8,0 - 0,745 \cdot 8,0) = 2,0$ mg/L. Cette masse restante de 2,0 mg/L est associée à la variable x de la droite de régression. Elle permet de calculer la masse d'oxygène par litre d'eau que le bruit de fond devrait dissoudre dans pareille situation de désoxygénation; soit 1,0 mg/L. La masse totale dissoute au deuxième traitement par l'expérience #6 est trouvée à partir de son taux de recouvrement de 0,16 donnée par la figure 3.4. Cela donne donc $(0,16 \cdot 8,0) = 1,3$ mg/L d'oxygène dissout lors de ce traitement. Le bruit de fond y a donc contribué à la hauteur de $(1,0 / 1,3 \cdot 100 = 77$ %. Le 23 % restant du 1,3 mg/L peut être associé à l'effet de l'ajout de gaz lors du deuxième traitement. Pour mieux comparer l'effet cumulé de l'ajout de gaz après les deux premiers traitements, il s'agit d'additionner la masse d'oxygène dissous due à l'ajout de gaz au premier traitement, soit la portion de 0,19 du recouvrement sur la figure 3.7 multiplié par la masse initialement retirée de 8,0 mg/L, ce qui donne 1,5 mg/L; additionné au 0,3 mg/L d'oxygène dissous calculé précédemment pour le deuxième traitement. Cela donne au total une masse par litre d'eau traité de 1,8 mg/L qui est dissout en raison du gaz. Par rapport au niveau de désoxygénation initiale de 8,0 mg/L, cela fait environ 23 % de cette masse qui après deux traitements est recouvrée en raison de l'ajout du gaz et non pas 11 % comme il serait possible de l'imaginer à partir de la figure 3.7 si cette dernière est mal interprétée.

ANNEXE XI

COURBES EXPÉRIMENTALES DU SIGNAL ENGENDRÉ PAR LE PASSAGE DU TRACEUR

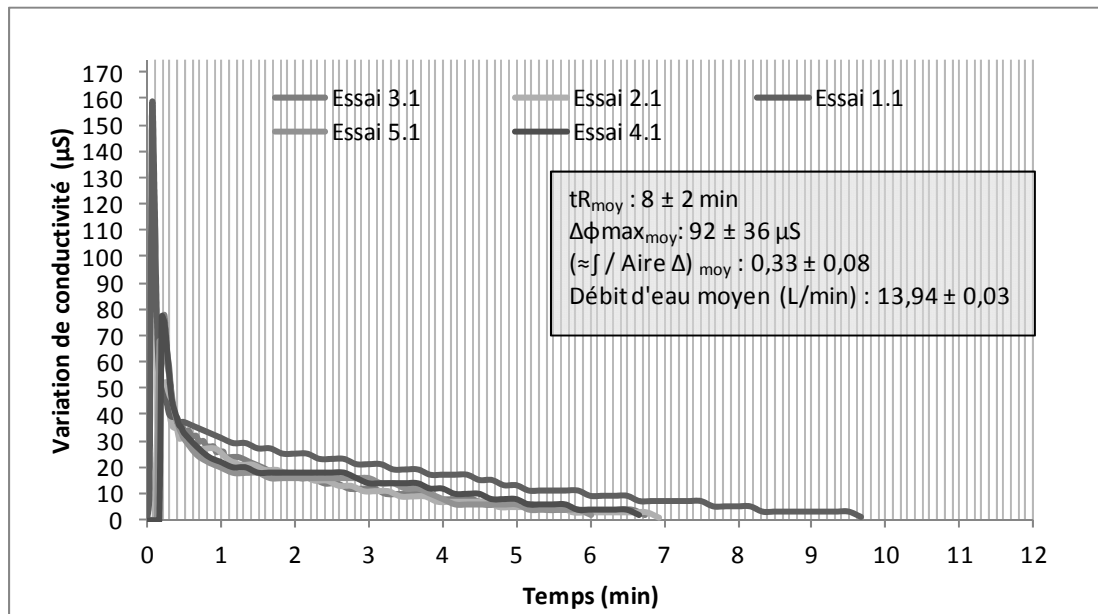


Figure-A XI-1 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) pour l'expérience 1-
Acquisition du bruit de fond $G/L = 0$

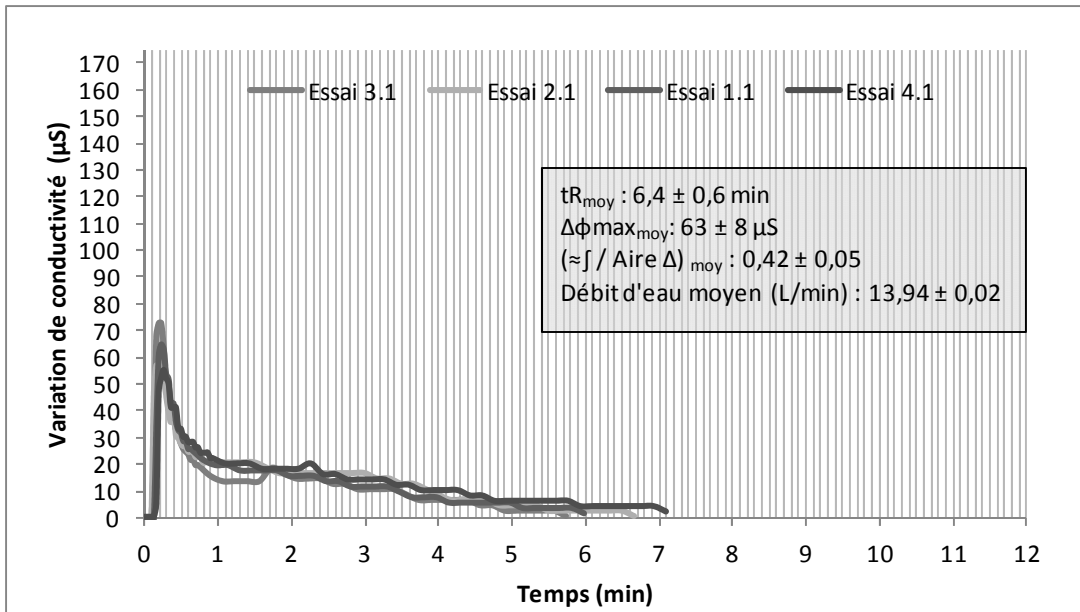


Figure-A XI-2 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 2- Référence jet libre $G/L = 0,0008$

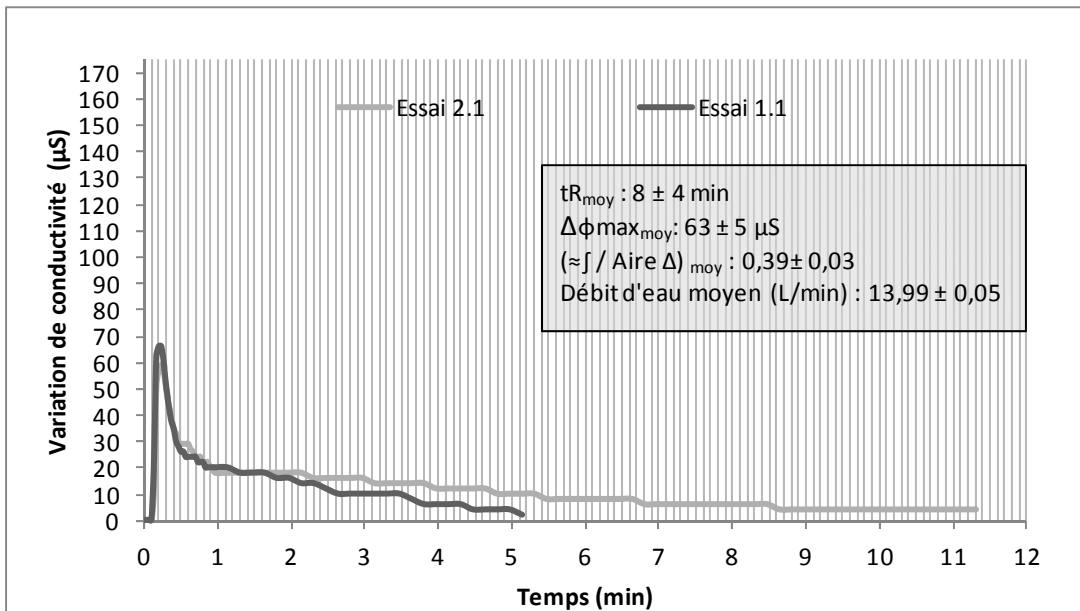


Figure-A XI-3 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 3- Référence jet libre $G/L = 0,002$

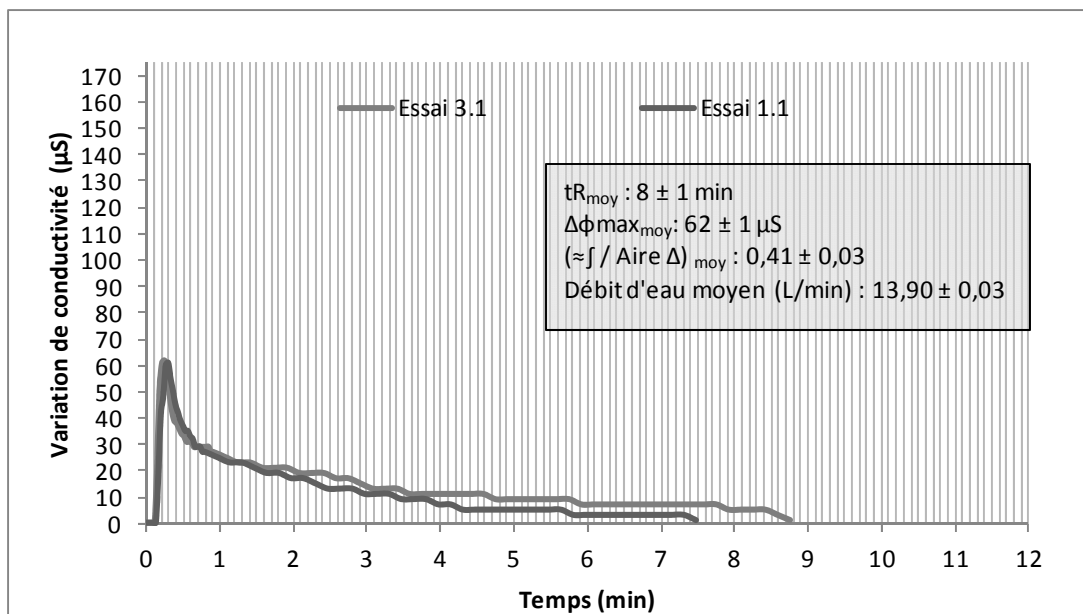


Figure-A XI-4 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) pour l'expérience 4- Référence jet libre $G/L = 0,008$

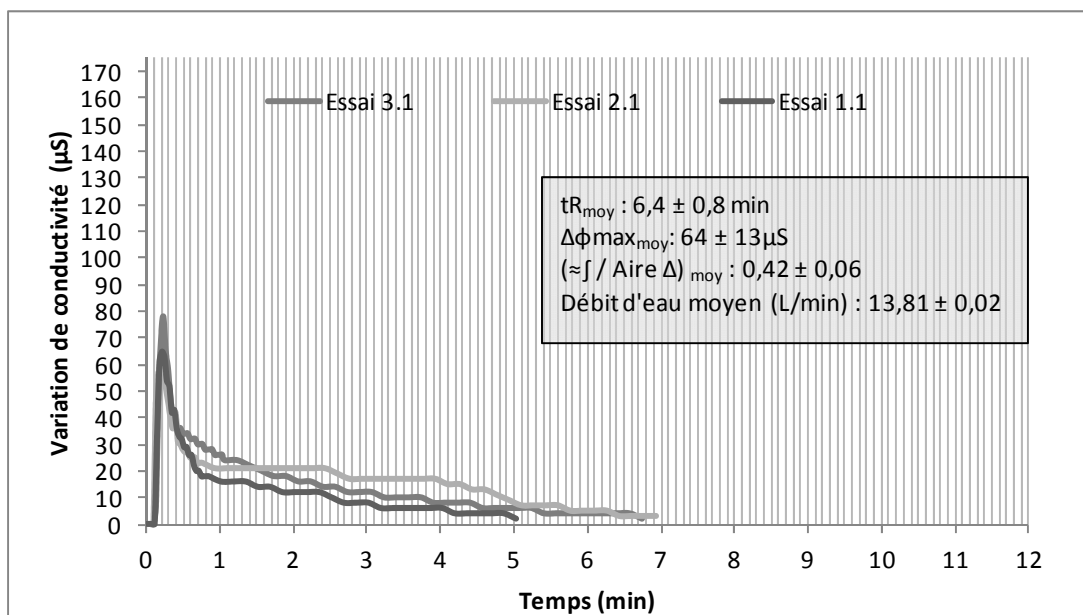


Figure-A XI-5 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) pour l'expérience 5- Référence jet libre $G/L = 0,02$

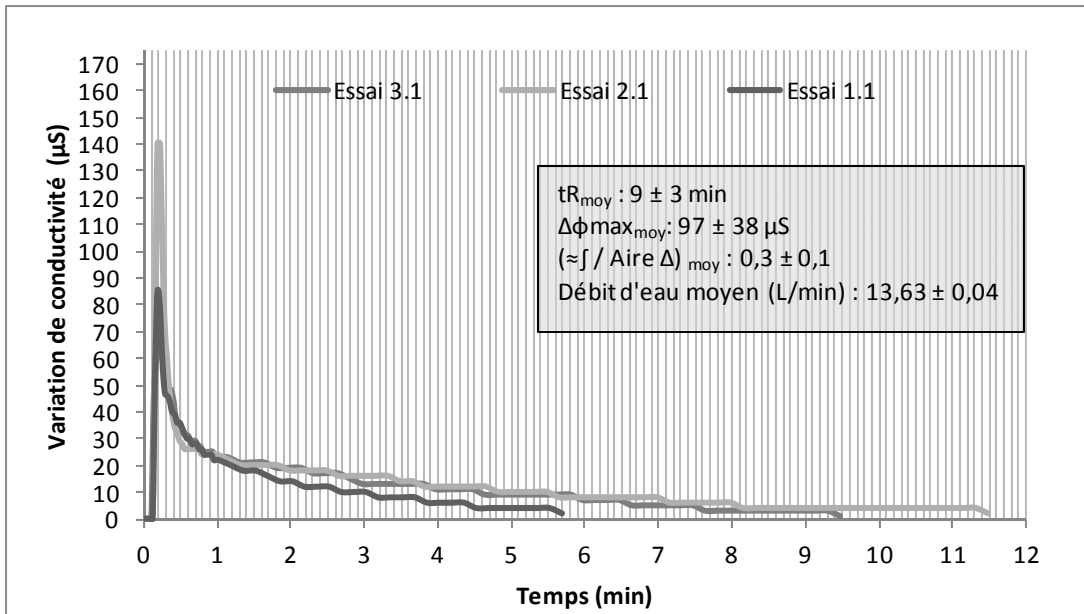


Figure-A XI-6 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 6- Référence jet libre $G/L = 0,08 = a/b$

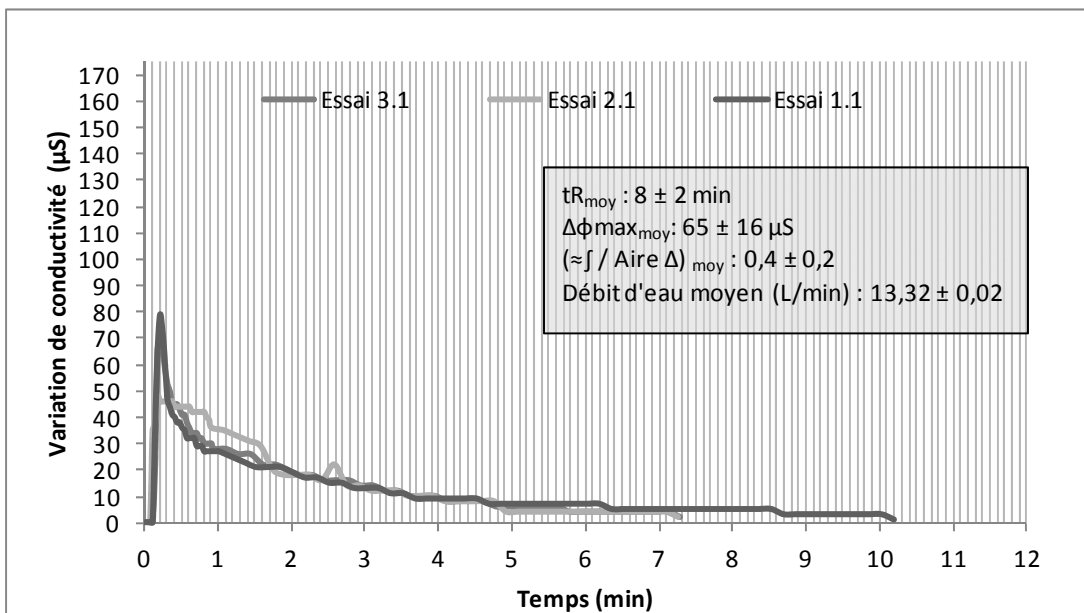


Figure-A XI-7 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 7- Référence jet libre $G/L = 0,3$

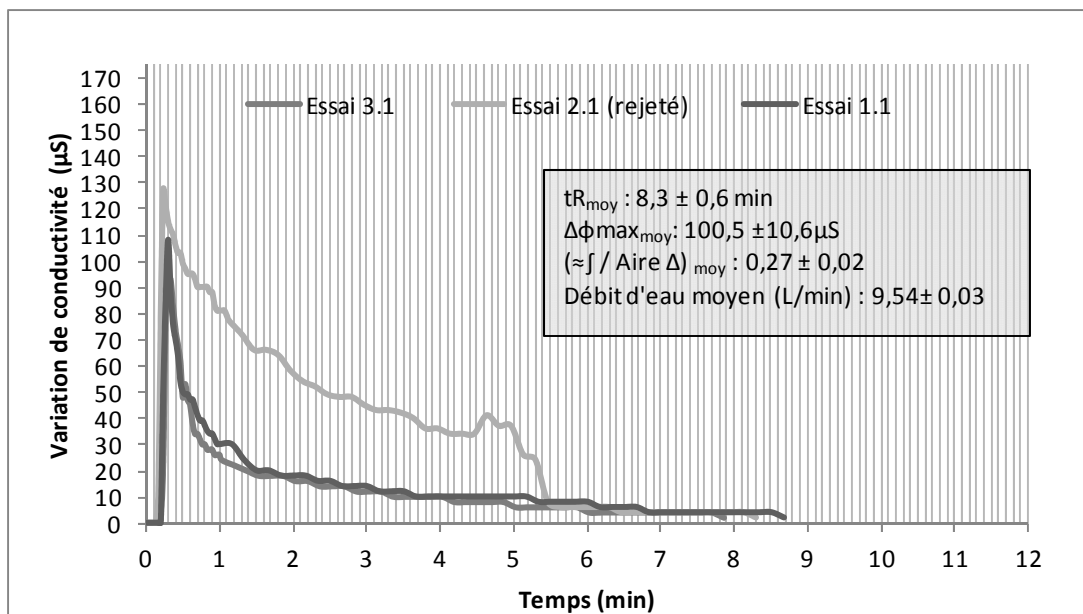


Figure-A XI-8 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) pour l'expérience 8- Référence jet libre $G/L = 0,08 = c/d$; $c \neq a$ et $d \neq b$

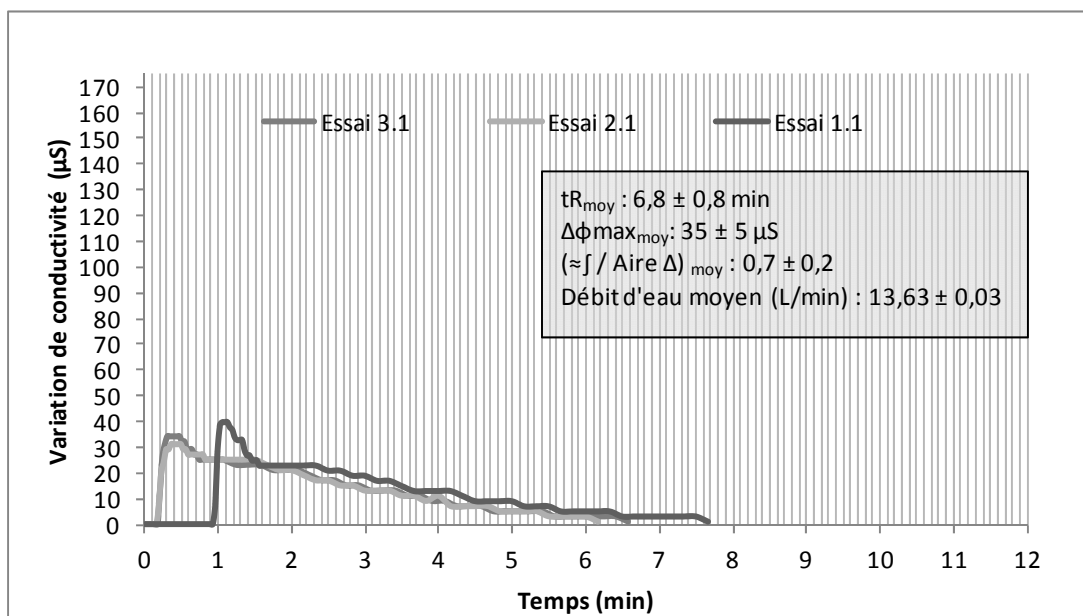


Figure-A XI-9 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) pour l'expérience 9- Buse à $G/L = 0,05$

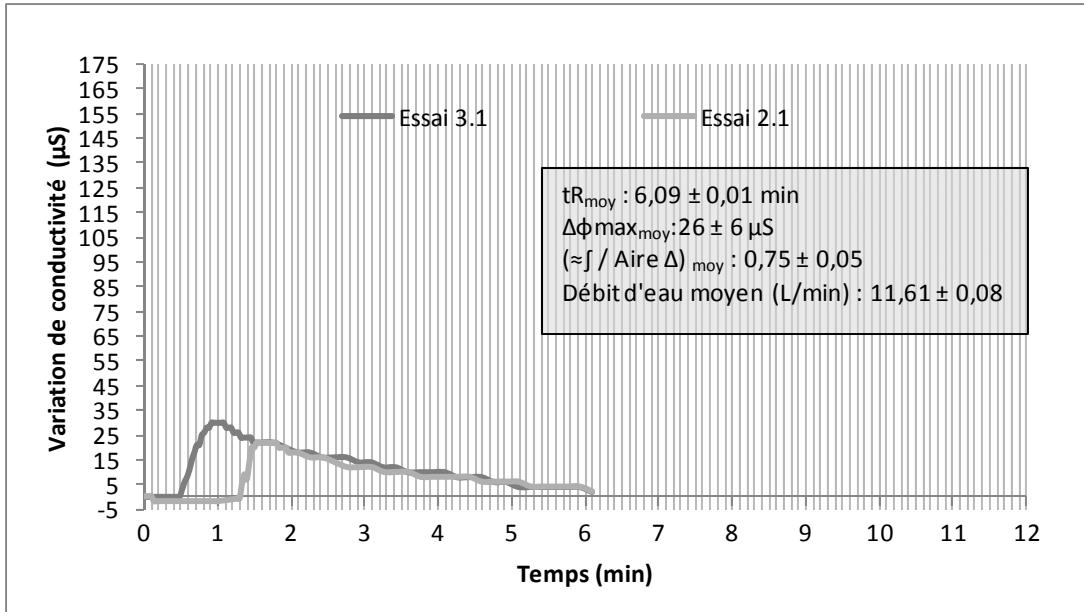


Figure-A XI-10 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 11- Mélangeurs statiques $G/L = 0,08$; 2e méthode d'injection

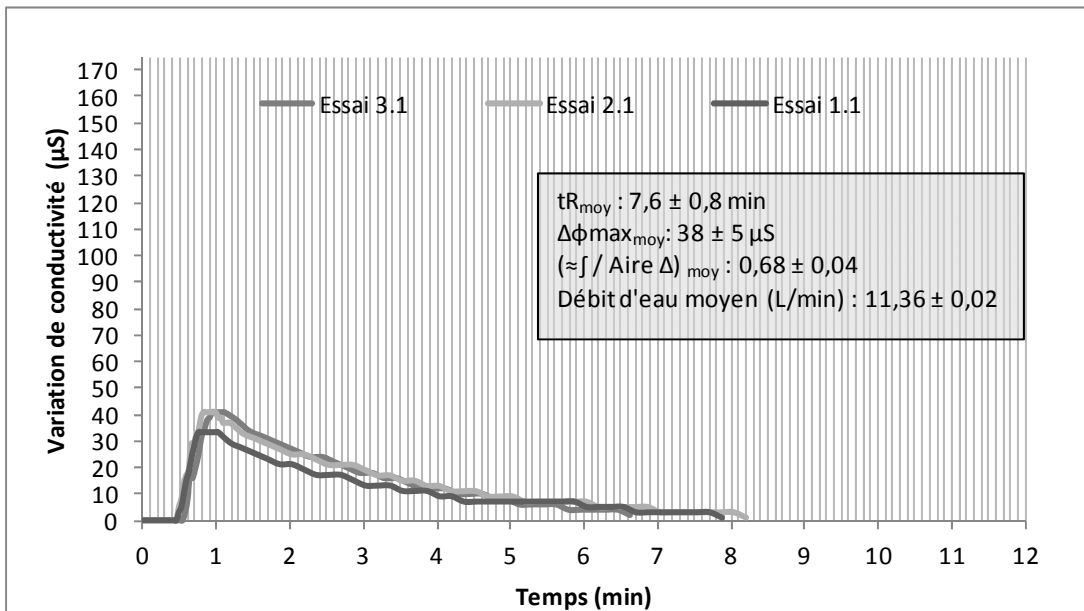


Figure-A XI-11 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 12- Mélangeurs statiques $G/L = 0,098$; 2e méthode d'injection

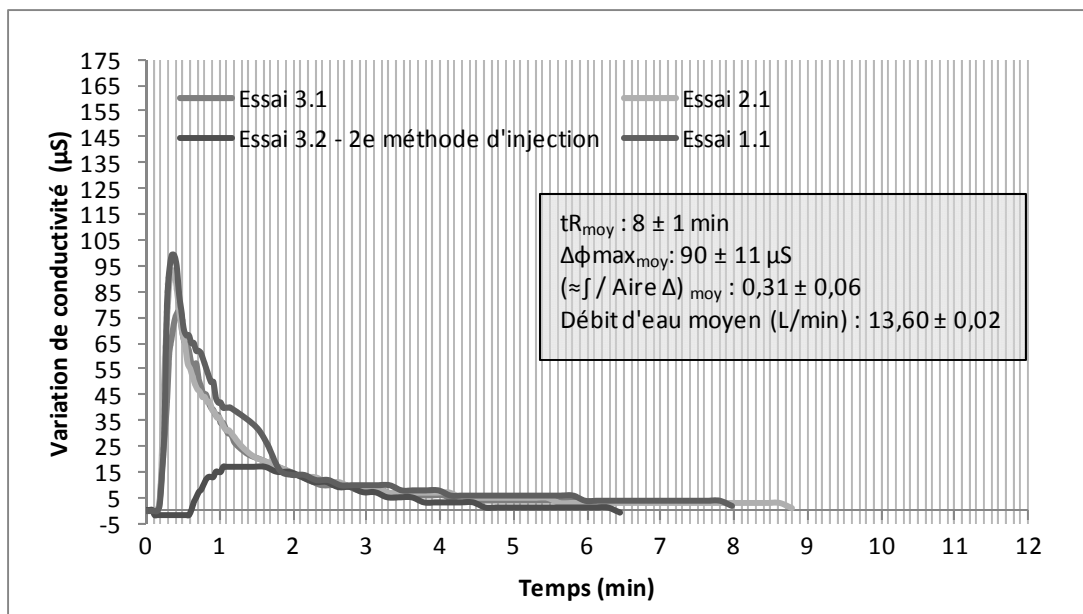


Figure-A XI-12 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 13-Anneaux de Rachig G/L= 0,08

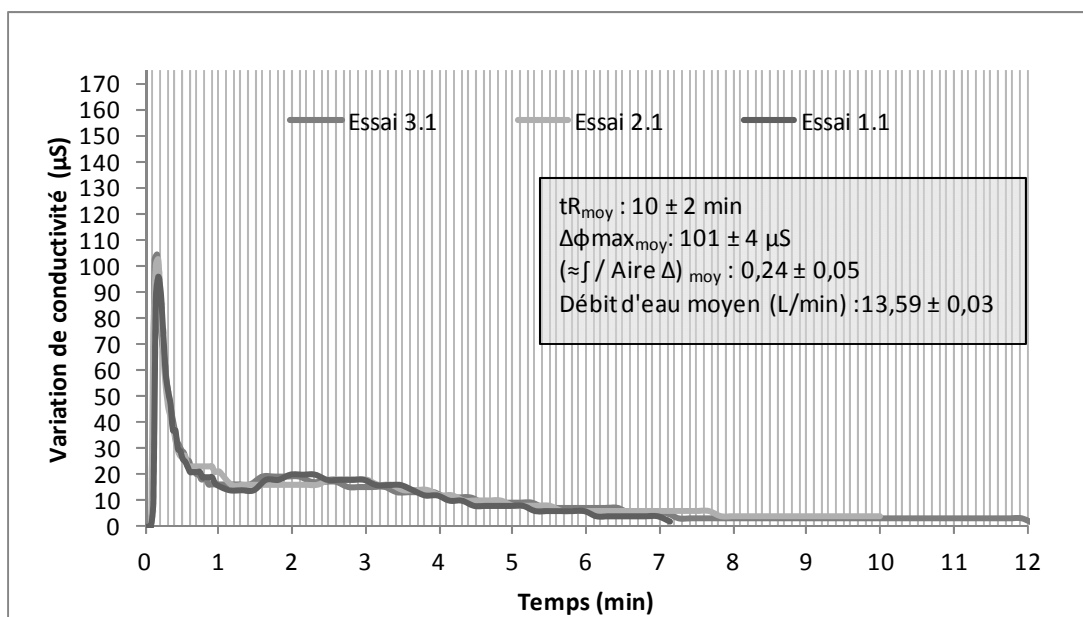


Figure-A XI-13 Signal de conductivité du sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(s)}$) pour l'expérience 14- LTCP G/L= 0,0

ANNEXE XII

GLOSSAIRE

Zone de propulsion : Section du pilote identifiant la section où un liquide amorce sa circulation vers le pilote grâce à une force motrice identifiable; elle est représentée principalement par les réservoirs et la pompe dans ce travail.

Zone de diffusion : Section du pilote incluant à la fois la zone de contact initiale entre le liquide et le gaz et toute la section principale où le mélange des deux phases s'effectue principalement.

Zone de production : Section du pilote d'où provient et par où circule le gaz utilisé jusqu'à l'injection pour fin de traitement de la phase liquide par mélange et dissolution.

Zone d'injection : Pièce ou partie du pilote servant à créer le contact initiale entre les deux phases liquide et gazeuse.

Zone de contact primaire : Partie du pilote modifiable agissant comme première zone de contact privilégié pour mélanger la phase liquide et gazeuse et situé entre l'injection et le diffuseur.

Zone du diffuseur : Pièce ou partie du pilote favorisant la distribution et le mélange des deux phases en vue d'un transfert dans un milieu récepteur subséquent.

Zone de contact secondaire : Cette section du pilote suit la zone du diffuseur et peut être associée à un milieu récepteur subséquent permettant le contact prolongé des deux phases en vu d'en augmenter l'efficacité de mélange, de dissolution et au final; de traitement. Cette unité est modifiable et multipliable en unité subséquente tertiaire, quaternaire, etc.

Ratio Gaz/Liquide ou G/L (volume/volume ou v/v) : Ratio volumique de la phase gazeuse sur la phase liquide déterminé en utilisant le débit de gaz divisé par le débit d'eau en utilisant les mêmes unités, par exemple en L/min.

Configuration du pilote : Ensemble des conditions associées aux différents paramètres physiques ou variables contrôlables du pilote lors d'une expérience mais également à sa conformation physique et sa structure mécanique interne. Il faut voir la configuration comme une unité de base. Un rapprochement naturel peut être réalisé avec la notion d'état en thermodynamique.

Mode du pilote : Le mode est un ensemble de configurations caractérisées par une propriété spécifique fixée et commune; c'est donc un sous-ensemble de l'ensemble des configurations possibles du pilote. Pour bien comprendre, en fixant chaque variable jugée utile ou indépendantes pour définir une configuration du pilote, cela définit simultanément autant de modes possibles à lesquelles appartient cette configuration. Dans le cadre actuel, l'appellation cible en priorité celles quant à la conformation physique ou à la structure mécanique interne du pilote pour laquelle de l'information pertinente et technique est recherchée pour fin de comparaison.

Mode jet libre : Configurations de base du pilote agissant comme références pour laquelle la zone de contact primaire du pilote doit être constituée simplement d'un tuyau d'une longueur fixée à $94,0 \pm 0,5$ cm.

Mode avec buse : Modification du mode jet libre de référence en ajoutant une buse dans la zone du diffuseur à l'extrémité du tuyau de contact primaire.

Mode avec mélangeurs statiques : Modification du mode jet libre de référence en ajoutant des mélangeurs statiques dans le tuyau de contact primaire.

Mode LTCP (Longueur du Tuyau de Contact Primaire) : Modification du mode jet libre de référence en changeant la longueur du tuyau de contact primaire pour la ramener à une valeur de $25,25 \pm 0,05$ cm.

Mode avec anneaux de Rachig : Modification du mode jet libre de référence en ajoutant dans la colonne de contact secondaire des petites plaques en aciers inoxydables typiques, appelées anneaux de Rachig.

Expérience : Une expérience est un ensemble d'essais réalisés en vue de tirer de l'information précise d'une configuration donnée du pilote par rapport à un mode d'intérêt.
Numéro de l'expérience : Permet d'identifier et de situer chronologiquement l'expérience dans l'ordre de réalisation.

Essai, unité de traitement, passage : Manipulations bien définies par un protocole expérimental permettant d'opérer le pilote en vue de traiter un volume spécifique d'eau.
Numéro de la série d'essais : Chaque expérience est réalisée un minimum de trois fois pour fin de reproductibilité des mesures. La série d'essai est donc synonyme de répétition d'une expérience. Le numéro de la série d'essais est donc équivalent à identifier de quelle répétition il s'agit.

Numéro de répétition d'un essai : Lors de la répétition d'une même expérience, une même catégorie d'essai peut être répétée et ce chiffre sert à cette identification. Il faut mentionner l'utilisation apocryphe du sens de première répétition. Elle signifie dans le contexte de ce travail première exécution valide.

Catégorie de l'essai : Une expérience est caractérisée par une série d'essais de nature différente. Quatre catégories sont identifiables, soit la mesure du blanc, la mesure du temps de résidence, la mesure du zéro et la mesure de la réoxygénation.

Mesure du blanc (Blanc): Suivant l'expérience choisie, essai permettant de mesurer la réponse analytique du pilote en ce qui a trait à l'eau d'essai initiale suivant les mêmes conditions d'injection de gaz que lors des essais de réoxygénation. Il a comme objectif principal de mesurer entre autre chose la température, la conductivité, le taux d'oxygène et le pH initial de l'eau d'essai.

Mesure du temps de résidence (TR) : Suivant l'expérience choisie, essai permettant de mesurer la réponse analytique du pilote en ce qui a trait à l'injection d'un traceur dans l'eau d'essai initiale suivant les mêmes conditions d'injection de gaz que lors des essais de réoxygénation. Dans le cas actuel, l'intrant chimique est une solution de sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(\text{aq})}$). Les signaux principalement observés sont la conductivité, le taux d'oxygène de l'eau et sa température.

Mesure du zéro (Zéro) : Suivant l'expérience choisie, essai permettant de mesurer la réponse analytique du pilote en ce qui a trait à la désoxygénation de l'eau par l'ajout d'une masse pesée de sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_{3(\text{aq})}$). Cet essai peut également être vu comme un conditionnement de l'eau pour la préparer à son oxygénation subséquente. La différence dans cet essai est que cette fois, aucun gaz n'est ajouté. Les signaux principalement observés sont le taux d'oxygène de l'eau, sa température, le pH et la conductivité.

Mesure de la réoxygénation (Réox) : Suivant l'expérience choisie, essai permettant de mesurer la réponse analytique du pilote en ce qui a trait à l'injection de gaz par rapport à une eau d'essai qui a été désoxygénée. C'est ce qui est appelé une étape dans la réoxygénation de l'eau ou un traitement en vu de saturer de nouveau l'eau d'essai. Les signaux principalement observés sont le pH, le taux d'oxygène de l'eau et sa température.

Circuit ouvert : Mode de transfert de l'eau à traiter qui consiste à ne faire circuler cette dernière qu'une seule fois dans le pilote en passant d'un réservoir à un autre.

Circuit fermé : Mode de transfert de l'eau à traiter qui consiste à faire circuler en boucle fermée l'eau dans un même réservoir.

Volume mort des réservoirs : Volume d'eau résiduel une fois le réservoir vidé par la pompe lors d'un essai.

TRP : Sigle utilisé pour désigner le temps nécessaire pour que la pompe atteigne son régime permanent; soit le temps écoulé entre le démarrage de la pompe et un débit d'eau stabilisé.

TE : Sigle utilisé pour désigner le temps total d'un essai mesuré manuellement à l'aide du chronomètre, du démarrage de la pompe à sa mise hors tension.

ToEP : Sigle utilisé pour désigner le total du volume d'eau ayant passé par la pompe. Ce volume peut être associé au total du volume d'eau traité.

Taux d'oxygène : Masse d'oxygène par unité de volume de liquide; principalement exprimé en mg/L.

Taux de dissolution : Taux d'oxygène qui est dissout lors d'un passage dans le pilote, principalement exprimé en mg/L dans le texte.

Niveau ou taux d'oxygénation : Taux d'oxygène cumulé ou mesuré dans le milieu liquide suivant un moment, une étape de traitement ou un état thermodynamique.

Taux de désoxygénation: Taux d'oxygène qui a été retirée de l'eau d'essai mécaniquement ou chimiquement.

Niveau de désoxygénation : Taux d'oxygénation mesuré après l'ajout de la masse de sulfites ou de tout autre mécanisme physique ou chimique permettant de retirer le taux d'oxygène désiré de l'eau d'essai.

Fraction recouvrée, taux de recouvrement ou ratio recouvré : Fraction généralement comprise entre 0 et 1 et caractérisant le taux de dissolution en fonction d'un taux d'oxygène spécifique théorique ou expérimentale suivant le cas; habituellement lié à l'état supposé de saturation.

Saturation : Désigne un état d'équilibre thermodynamique caractérisant la masse d'oxygène dissous dans l'eau et celle présente dans l'atmosphère aux conditions de température et de pression données.

Niveau ou taux de saturation : Niveau d'oxygénation à saturation

Capacité à dissoudre : Variable ou propriété caractérisant la distribution ou l'évolution des taux de dissolution lors du processus dynamique d'oxygénation de l'eau.

Capacité à saturer : Variable caractérisant le retour à la saturation mais en le comparant à un état d'équilibre de référence initiale, dans le cadre actuel le niveau d'oxygène initial avant la désoxygénation. Peut être caractérisé dans l'absolu en divisant le niveau de saturation final de l'eau d'essai par le niveau de saturation initial.

Capacité à interagir : Terme générique utilisé pour décrire la capacité de l'agent traitant utilisé à se rendre au site du traitement ou à la source du problème afin d'y interagir chimiquement ou physiquement suivant le cas, en considérant toutes les variables influençant le processus.

Capacité à oxygéner : Terme utilisé pour parler de la performance générale de dissolution de l'oxygène dans le milieu englobant toutes les variables influençant le processus.

Efficacité de transfert : Notion traitant de la comparaison entre la masse de soluté (agent traitant) qui est dissoute dans le milieu par rapport à la masse totale ajoutée. Elle s'exprime

par une fraction ou un pourcentage suivant le cas. Elle permet d'évaluer en fait si l'utilisation de l'agent traitant est efficace.

Efficacité de transfert «directe» versus «comparative» : distinction réalisée dans le cadre d'analyse des résultats expérimentaux afin de distinguer deux approches de comparaison de l'efficacité de transfert. Celle dite «**directe**» consiste à utiliser la masse totale d'oxygène dissous attribuable à l'ajout du gaz lors d'un traitement. Celle dite «**comparative**» se réfère à la masse d'oxygène dissous attribuable au gaz ajouté mais que le bruit de fond à une même étape de traitement n'aurait pas été en mesure de dissoudre. Elle est nécessairement inférieure ou égale à l'efficacité de transfert «directe».

Temps de résidence (tR) : durée physique de la présence d'un traceur dans le circuit d'eau du pilote du moment de l'injection au moment où ce dernier est complètement éliminé et recueilli dans le réservoir. Le temps de résidence est mesuré de la façon la plus simple. C'est le temps observé pour que le signal revienne à sa valeur initialement mesurée lors de l'injection du marqueur. Cependant, un choix pratique doit être réalisé lors du traitement des données pour fixer plus adéquatement le moment du retour au signal initial. Le choix est d'additionner le maximum des moyennes des écart-types observés lors de la mesure de la conductivité de l'eau initiale dans les essais appelés mesure du blanc pour toutes les expériences réalisées. Par exemple, si la valeur de la conductivité initiale est de 315 uS et que l'écart-type maximum parmi les moyennes calculées des écarts-types pour chacune des expériences est de 2 uS; alors le temps de résidence est arrêté dès que le signal a atteint une valeur inférieure ou égale à 317 uS. Si cette valeur n'est pas atteinte, alors on utilise le moment de la fin de l'essai pour fixer le temps de résidence.

$\Delta\phi_{\text{max}_{\text{moy}}}$: Variation maximale moyenne du signal de conductivité des différentes courbes de la mesure du temps de résidence due à l'injection de la solution de sulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_3(\text{s})$) comme traceur.

Aire sous la courbe (\approx) : Approximation de l'intégrale sous la courbe du signal de la variation de la conductivité en fonction du temps lors de l'ajout d'un marqueur à l'eau d'essai. Les intervalles de temps sont générés ainsi $\Delta t_1 = (t_1 - t_0); \dots; \Delta t_R = (t_R - t_{(R-1)})$ où t_1 est le premier temps noté après l'injection du marqueur suivant les intervalles de mesure définis. Les valeurs de conductivités mesurées translatées servant à approximer la fonction sont celles mesurées aux intervalles de temps t_1 à t_R que l'on notera $\Delta\phi_1$ à $\Delta\phi_R$. Ainsi, la somme suivante est calculée: $\sum(\Delta\phi_i * \Delta t_i)$ où i varie de 1 à R . Noter qu'à R est associé un nombre entier, mais ce dernier varie d'un essai à l'autre.

Aire du signal en triangle (Aire Δ) : Ceci est l'aire caractéristique associé à un comportement linéaire du signal de conductivité qui serait croissant avant le maximum et décroissant par la suite. Cette dernière est calculée de la façon suivante: $(t_R * \Delta\phi_{\max})/2$. C'est une idéalisation de la distribution du traceur permettant de donner de l'information supplémentaire en comparant à l'aire réelle estimée sous la courbe.

Fenêtre de mesure : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, la fenêtre de mesure est définie comme la zone ou le quadrillage déterminés dans lesquelles les variables d'intérêts sont mesurées ou qualifiées.

Panache de bulles : appellation typique utilisée pour identifier les fichiers et les photos prises avec la caméra haute-vitesse et servant à la caractérisation du jet d'eau sortant du tuyau de contact primaire.

Taille de bulles: appellation typique utilisée pour identifier les fichiers et les photos prises avec la caméra haute-vitesse et servant à la caractérisation de la taille, de la densité, de la forme et de la distribution des bulles à la sortie du tuyau de contact primaire.

H : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, lettre attribuée pour identifier la hauteur du jet d'eau sortant du tuyau de contact primaire.

L : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, lettre attribuée pour identifier la mesure de largeur du jet d'eau sortant du tuyau de contact primaire.

T : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, lettre attribuée pour identifier la mesure de la taille d'une bulle associée au diamètre maximal «traçable» sans discontinuité.

RT : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, lettres attribuées pour identifier la mesure de la valeur de référence fixée sur le tuyau mais dans les photos de type «Taille de bulles».

RP : Dans le traitement des photos prises avec la caméra à capture rapide, lettres attribuées pour identifier la mesure de la valeur de référence fixée sur le tuyau mais dans les photos de type «Panache de bulles».

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atkins, Peter, Julio de Paula. 2002. *Physical Chemistry*, 7^e éd., New York: W.H. Freeman and Company, 1140 p.
- Baig S. and Roustan M. 2010. « Emerging micropollutants a new challenge for water management ». In *Ozone & related oxidants: solutions for emerging pollutants of concern to the water and the environment*. (Geneva, Switzerland, April 28-30,2010). International Conference, organized by EA3G-IOA.
- Bale, Allison R. 2003. « Ozone mass transfer analyses of two new ozone reactor designs ». Civil and environmental engineering thesis, Canada, University of Alberta (Canada), 172 p.
- Burns, Nick, Jeff, Neemann, Michael Thompson and Pat Ryan. 2007. « Pipeline Contactor Design and Retrofit Fundamentals », *Ozone: Science & Engineering*, vol.29, n°4, p. 291-296.
- F. Gagné, André C., Cejka P., Hausler R., Fournier M. et Blaise C. 2008. « Immunotoxic effects on freshwater mussels of a primary-treated wastewater before and after ozonation: A pilot plant study». *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol.69, n°3, p. 366-373.
- C. Gagnon, Lajeunesse A., Cejka P, Gagné F. et Hausler R. 2008. « Degradation of selected acidic and neutral pharmaceutical products in a primary-treated wastewater by disinfection processes». *Ozone: Science & Engineering*, vol.30, n°5, p. 387-392.
- Harris, Daniel C. 2007. *Quantitative Chemical Analysis*, 7^e ed., New York: W.H. Freeman and Company, 663 p.
- Hausler R., Guillaume S. et Gesuale G. 2009. *Potentiel de l'ozonation pour la désinfection des eaux usées de la station d'épuration du secteur de Gatineau*. Rapport présenté à la ville de Gatineau, 25 p.
- Panda, Kishora Kumar. 2005. « Ozone mass transfer and reaction in in situ and stirred tank reactors ». Civil engineering dissertation, Manhattan, Kansas State University, 259 p.
- Labelle, Jacques et Armel Mercier. 1993. *Introduction à l'analyse réelle*, 1^{re} éd. « Collection universitaire de mathématiques », Mont-Royal: Modulo, 414 p.

- Langlais, B., D.A. Reckhow and D.R. Brink. 1991. *Ozone in Water Treatment- Application and Engineering.*, Chelsea : Lewis Publishers Inc, 569 p.
- Masschelein, W.J. 1991. *Ozone et Ozonation des Eaux*, 2e éd. Coll. « Technique & Documentation ». Paris: Lavoisier, 385 p.
- Murray P. et J. de la Noüe . 1988.« Évaluation à l'échelle pilote d'un aérateur à cheminement prolongé ». *Revue des sciences de l'eau*, vol.1, n° 3, p.179-201.
- Neemann, Jeff, Robert, Hulsey, Gass, Julia, Jim Stockton et Robert Noelle. 2002. « The use of Injectors and Nozzles for Sidestream Ozone Addition », In *2002 Water Quality Technology Conference.* (Seattle, November 10-14, 2002), American Water Works Association.
- Solomons, Graham et Craig Fryhle. 2000. *Chimie Organique*, adaptation de Normand Voyer de la 7^e édition de *Organic Chemistry*, Mont-Royal : Modulo, 1151 p.
- Tamir, A., D. Herskowitz, *et al.* 1990. « Spray- and bubble-type absorption of acetone from air into water in a two-impinging-jets absorber». *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 29 (Compendex): 272-277.
2001. *THE MERK INDEX : an encyclopédia of chemicals, drugs, and biologicals*, thirteenth ed, Whitehouse Station: MERK&CO., INC, 1818 p.
- Yasuda, K., Y. Wang, *et al.* 2010. « Development of airlift bubble column dispersed with micro-bubbles». *Canadian Journal of Chemical Engineering* ,88 (Compendex): 518-522.