

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE FORTIFICAÇÃO
E CONSTRUÇÃO

FERNANDO MATHEUS GUIMARÃES BEZERRA

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE SISTEMA DE CANAIS PARA O
CONTROLE DE AGENTES PATOLÓGICOS COM MODELO
COMPUTACIONAL NO TELEMAC3D

Rio de Janeiro

2019

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FERNANDO MATHEUS GUIMARÃES BEZERRA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE SISTEMA DE CANAIS PARA O
CONTROLE DE AGENTES PATOLÓGICOS COM MODELO
COMPUTACIONAL NO TELEMACH3D**

Tese de Graduação apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para aprovação na referida disciplina.

Orientadores: Prof. Cap Igor da Silva Rocha Paz
Prof. Brigitte Vinçon-Leite

Rio de Janeiro

2019

c2019

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

624 Bezerra, Fernando Matheus Guimarães

B732a Modelagem hidrodinâmica de sistema de canais para o controle de agentes patológicos com modelo computacional no Telemac3D / Fernando Matheus Guimarães Bezerra; orientado por Igor da Silva Rocha Paz; Brigitte Vinçon-Leite – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2019.

42p. : il.

Projeto de Fim de Curso (PFC) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.

1. Curso de Engenharia de Fortificação e Construção – Projeto de Fim de Curso. 2. I. Paz, Igor da Silva Rocha. II. Vinçon-Leite, Brigitte. III. Instituto Militar de Engenharia. IV. Modelagem hidrodinâmica de sistema de canais para o controle de agentes patológicos com modelo computacional no Telemac3D.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

FERNANDO MATHEUS GUIMARÃES BEZERRA

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE SISTEMA DE CANAIS PARA O
CONTROLE DE AGENTES PATOLÓGICOS COM MODELO
COMPUTACIONAL NO TELEMACH3D**

Relatório de Projeto de Final de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para aprovação na referida disciplina.

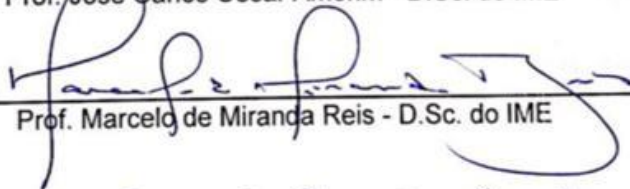
Orientadores: Prof. Igor da Silva Rocha Paz, D. Sc.
Prof. Brigitte Vinçon-Leite

Aprovada em / /2019 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. Igor da Silva Rocha Paz - D.Sc. do IME

Prof. José Carlos Cesar Amorim - D.Sc. do IME



Prof. Marcelo de Miranda Reis - D.Sc. do IME



Prof.ª. Rebeca Montenegro Dias de Carvalho Saraiva - D.Sc. do IME

RESUMO

Os corpos hídricos urbanos são cada vez mais utilizados para atividades recreativas, incluindo natação. Em Paris, a perspectiva dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2024 traz à luz a questão do mergulho em água corrente e o objetivo de torná-lo sustentável a longo prazo na região de Paris. No entanto, a prática de tais atividades requer uma boa qualidade da água, cumprindo as normas sanitárias baseadas na concentração de indicadores de bactérias fecais. Para antecipar um possível risco sanitário, uma estação de monitoramento pode ser implementada a montante da área de banho. Em seguida, o tempo de transferência do contaminante microbiológico deve ser calculado com precisão, a fim de prever o nível de contaminação na área de banho. Dessa forma um modelo hidrodinâmico pode ser uma ferramenta útil para atingir esse objetivo. Na bacia de La Villette (Paris, França), como parte do programa Paris-Plage, uma área de natação foi implementada desde o verão de 2017. Apresentamos neste trabalhoos primeiros resultados sobre a implementação de um modelo hidrodinâmico 3D da bacia de La Villette, o transporte de E.coli para a bacia e a avaliação de viabilidade dessa abordagem de modelagem.

ABSTRACT

Urban water bodies are increasingly used for recreational activities, including swimming. In Paris, the perspective of the Olympic and Paralympic Games in 2024 brings to light the question of open water swim and the objective to make it sustainable on longer term in the Paris region. However, the practice of such activities requires a good water quality, complying with sanitary regulations based on the concentration of faecal indicator bacteria. To anticipate a possible sanitary risk, a monitoring station can be implemented upstream the bathing area. Then the transfer time of the microbiological contaminant must be accurately computed in order to derive the contamination level in the bathing area. A hydrodynamic model can be a useful tool for achieving this goal. In La Villette basin (Paris, France), as part of Paris-Plage programme, a bathing area has been implemented since summer 2017. We present in this work first results about the implementation of a 3D hydrodynamic model of La Villette basin, the transport of *E.coli* towards the basin and the feasibility assessment of this modelling approach.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 RECURSO HÍDRICO.....	9
1.2 ANÁLISE DE COLIFORMES.....	9
1.3 INTRODUÇÃO AO CENÁRIO	10
1.4 ESTRUTURA E OBJETIVOS.....	11
2. REVISÃO LITERÁRIA	12
2.1 CONTAMINAÇÃO POR PATÓGENOS EM RIOS.....	12
2.1.1 POSSÍVEIS FONTES.....	13
2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	13
3. LOCAL DE ESTUDO.....	14
3.1 CANAL LA VILLETTE.....	14
3.1.1 GEOMETRIA E HIDROLOGIA	15
3.2 DADOS AMBIENTAIS.....	16
3.2.1 TEMPO.....	16
3.2.2 HIDROLOGIA.....	17
3.3 FONTE DE CONTAMINAÇÃO.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 PARÂMETROS DE MODELAGEM	19
4.1.1 EQUAÇÕES.....	19
4.1.2 FUNDO.....	21
4.1.3 MALHA (GEOMETRY FILE)	23
4.1.4 CONFIGURAÇÃO A MONTANTE E A JUSANTE (BOUNDARY CONDITIONS FILES)	23
5. RESULTADOS	24
5.1 TROCA DE CALOR	24
5.2 VELOCIDADE 2D.....	26
5.3 VELOCIDADE 3D.....	28

5.4 VELOCIDADE 3D E TROCA DE CALOR.....	30
6. BIBLIOGRAFIA.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- a) Patogênico (E. coli), b) Aparelho utilizado para contagem do coliforme em laboratório.....	10
Figura 2 - Localização do canal na área de Paris	15
Figura 3 - Área de estudo La Villette	16
Figura 4 - Ponto de medição da área	18
Figura 5 - Seção de medição da batimetria.....	22
Figura 6 - Manual da Telemac (FRICÇÃO DE FUNDO)	22
Figura 7 - Configuração da malha do Villette	23
Figura 8 - Arquivo de Boundary Conditions	24
Figura 9 - Troca de calor (sem fluxo) com uma forma natural (cima) e uma forma quadrada (baixo).....	25
Figura 10 - Gráfico de temperatura (Natural)	26
Figura 11 - Gráfico de temperatura (quadrado).....	26
Figura 12 - Perfis de velocidade 2D	27
Figura 13 - Simulação com correção de coeficiente de rugosidade	28
Figura 14 - Velocidade 3D (velocidade inicial zero)	29
Figura 15 - Velocidade 3D (fonte pontual).....	29
Figura 16 - Variação do nível de água de entrada (caso 2D).....	30
Figura 17 - Velocidade 3D (troca de calor + taxa de fluxo)	32
Figura 18 - Temperatura (troca de calor + fluxo)	32
Figura 19 - Variação do nível de água de entrada (caso 3D).....	33
Figura 20 - Garrafa com GPS(esquerda) e local de lançamento (direita).....	33
Figura 21 - Locais da lançamentos separadaos em 2 passos	34
Figura 22 - Ponto de captação.....	35
Figura 23 - Medições durante o tempo do GPS	36
Figura 24 - Velocidade da água na superfície.....	38
Figura 25 – Temperatura da superfície da agua.....	38
Figura 26 - Concetração de E. coli	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Classificação dos padrões de água	11
Tabela 2- Condições de contorno nos pontos de saída e de entrada.....	31
Tabela 3 – Velocidade do modelo e do experimento	37

1. INTRODUÇÃO

1.1 RECURSO HÍDRICO

A água é um recurso finito, e mesmo que abundante, o volume dessa matéria no planeta com padrões mínimos para a utilização humana vem diminuindo, e em algumas regiões no mundo já se apresenta a preocupação constante de obtê-lo para a população. Dessa forma, o controle da contaminação dos cursos d'água é uma necessidade que cresce com a escassez do recurso, e portanto ferramentas como o monitoramento diário das concentrações de patogênicos ou a modelagem da dispersão dos contaminantes são modos de garantir que os danos aos rios, lagos e reservatórios sejam diminuídos, ou até mesmo evitados através de medidas preventivas.

1.2 ANÁLISE DE COLIFORMES

No controle dos padrões de água, arbitra-se o coliforme como uma medida de patogênicos indireta, já que a presença desse tipo de bactéria é associada à contaminação devido a dejetos provenientes de intestinos de seres vivos, e dessa forma, a possível presença de doenças (Figura 1.a) de veiculação hídrica. Portanto, o controle do coliforme nos meios hídricos deve ser feito de forma preventiva, com análise de sua concentração tanto em água para o consumo, quanto para o contato direto em humanos, no caso de praias, lagos e rios (Domingues et al., 2007).

No Brasil, o controle da qualidade da água para consumo humano tornou-se uma questão de saúde pública a partir da década de 70, com o Decreto Federal nº 79.367 de 09/03/1977, que estabelecia como competência do Ministério da Saúde a definição do padrão de potabilidade da água para consumo humano. As normas e o padrão de potabilidade da água foram instituídos pela Portaria nº 56/Bsb/1977, que se constituiu na primeira legislação federal sobre a potabilidade de água para consumo humano editada pelo Ministério da Saúde (Domingues et al., 2007).

Juntamente com essa portaria que normatiza as concentrações, cresceu a preocupação de proteger as principais fontes de recurso hídrico das grandes cidades, e dessa forma a análise laboratorial (Figura 1.b) em afluentes ou até mesmo em lençóis subterrâneos (Sales and de Lacerda, 2017).



Figura 1- a) Patogênico (E. coli), b) Aparelho utilizado para contagem do coliforme em laboratório

1.3 INTRODUÇÃO AO CENÁRIO

O uso de recursos hídricos para fins recreativos tem mostrado crescente importância social e econômica devido à busca pelo desenvolvimento de atividades de lazer em contato com o ambiente natural, a fim de contrabalançar o modo de vida em um ambiente urbanizado (por exemplo, Hintaran *et al.*, 2018, Meyerhoff *et al.*, 2010). Em Paris, a perspectiva dos Jogos Olímpicos e Paraolímpicos de 2024 traz à luz a questão do mergulho em água corrente e o objetivo de torná-lo sustentável a longo prazo na região de Paris.

No entanto, a prática de tais atividades exige requisitos específicos de qualidade da água, ou seja, águas que obedecem às condições de banho. De acordo com a Diretriz de Águas de Banho da União Europeia (UE), existem dois principais

parâmetros microbiológicos para controlar os padrões de água: enterococos intestinais e *Escherichia coli* (*E. coli*). A prefeitura de Paris classifica a qualidade da água (Tabela 1) como insuficiente, suficiente, boa e excelente, de acordo com a concentração FIB (bactéria indicadora fecal) da medida em UFC (unidades formadoras de colônia) por 100 ml.

Tabela 1 -Classificação dos padrões de água

Indicadores (UFC/100mL)	Excelente	Bom	Suficiente
<i>Escherichia coli</i>	95% < 500	95% < 1000	90% < 900
Intestinal enterococci	95% < 200	95% < 400	90% < 330

Portanto, valores insuficientes de concentração exigem que toda a atividade de banho seja suspensa até que o padrão de água suficiente seja atingido. Assim, o monitoramento deve ser frequente para garantir que a concentração seja menor que a classificação insuficiente (900ufc / 100ml). E às vezes é difícil obter esses dados com rapidez suficiente para fazer um alerta nessa área, pois a medição leva em média 8 horas e, em caso de fortes chuvas, os valores podem mudar significativamente.

Para controlar esses valores, é necessário compreender a dinâmica da velocidade e temperatura ao longo do canal, uma vez que os microrganismos podem proliferar e alterar algumas dessas concentrações (Cha et al., 2016), principalmente em baixa velocidade. Por outro lado, fortes chuvas podem suspender sedimentos contendo contaminantes e coliformes (Chen e Liu, 2017). Portanto, a modelagem da área de estudo é importante para prever o comportamento do fluxo de água ao longo do canal. Este tipo de simulação pode ser feito com um software computacional.

1.4 ESTRUTURA E OBJETIVOS

Devido à grande importância do monitoramento da concentração de Enterococos Intestinais e *E. coli*, juntamente com o atraso na contabilização desses dados, o

objetivo desta pesquisa é fazer modelagem hidrodinâmica do canal La Villette (Paris, França) e simular:

- Transporte de poluentes;
- A dinâmica da velocidade e da temperatura ao longo do canal, para analisar a possibilidade de crescimento e deposição desses microrganismos.

Esta informação será importante para garantir melhor o padrão da água na área de banho, além de permitir o planejamento de medidas que protejam esta área dos picos de concentração, que são muito perigosos, especialmente em períodos chuvosos.

2. REVISÃO LITERÁRIA

Entre as atividades recreativas ou de lazer relacionadas à água, são considerados os usos como esportes de aventura, navegação recreativa e pesca. O uso da água é diverso, e há um uso estético e paisagístico da natureza, no qual os ecossistemas aquáticos têm uma relevância especial.

O desenvolvimento de algumas dessas atividades está intimamente ligado ao cumprimento dos objetivos ambientais e depende da existência de pressões escassas e de um estado ecológico adequado (Liu et al., 2006). Por outro lado, a promoção de atividades recreativas e o turismo científico em torno do meio aquático atraem uma grande demanda social.

Portanto, é importante rastrear os contaminantes nocivos à saúde e identificar suas possíveis fontes. Então, com a informação, é possível prever cenários por ferramentas como modelagem computacional para ajudar a garantir um padrão de água saudável (Niazi et al., 2015).

2.1 CONTAMINAÇÃO POR PATÓGENOS EM RIOS

A análise laboratorial da água é de grande importância, no entanto, para uma análise mais ampla de algum tipo de patógeno também é importante para facilitar o controle do padrão da água. Desta forma, a contagem de E. coli (Dorner et al.,

2006) é escolhida como um indicador indireto de doenças de transmissão aquáticas.

Os agentes biológicos são influenciados pelo ambiente em que se encontram, de modo que as condições ambientais podem ser propícias ao seu crescimento ou decadência. Assim, *E. coli* tem uma maior proliferação com altas temperaturas e na presença de fortes chuvas (Cha et al., 2016)

Outro fator que influencia o monitoramento desses patógenos é que entre os pontos de medição (Islam et al., 2018), os valores de suas concentrações podem variar devido à atividade biológica ao transporte no fluxo. Por isso, é necessário considerar este tipo de variação (Coffey et al., 2010) na simulação computacional.

2.1.1 POSSÍVEIS FONTES

A presença de coliformes no ambiente está relacionada a resíduos de organismos vivos, enquanto este tipo de agente biológico está presente no intestino dos animais. Portanto, o vazamento de esgoto, a água que flui através da área urbana que por trás da residência de animais como pássaros e cães são a fonte mais importante (Jovanovic et al., 2014). Além disso, a contaminação direta do curso de água pelo homem, tais como barcos sem dispositivos de armazenamento de resíduos que jogam este resíduo não tratado na água.

Mas a inclusão do modelo de transporte de sedimentos em suspensão nas simulações é de fundamental importância, pois as concentrações de coliformes fecais são significativamente influenciadas pela concentração de sedimentos em suspensão no sistema estuarino (Chen e Liu, 2017).

2.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Com uma maior conscientização das questões de qualidade da água microbiana nos sistemas de bacias hidrográficas, há um ímpeto crescente para previsões de concentrações, fluxos e cargas de microrganismos fecais em diferentes tipos de corpos d'água para orientar futuras atividades de controle da qualidade da água.

A redução da incerteza nos resultados da modelagem tem que ser direcionada e pode ser alcançada através de experimentação ativa e monitoramento de campo, águas subterrâneas e subjacente ao destino de sedimentos e transporte de microrganismos fecais em unidades de balanço de massa hidrológicas heterogêneas. A complexidade e a variabilidade dos processos e ambientes microbianos de destino e transporte, bem como as diferenças nas finalidades de modelagem, garantem o desenvolvimento adicional de diferentes modelos de destino e transporte microbiano em escala de bacias hidrográficas (Cho et al., 2016).

3. LOCAL DE ESTUDO

3.1 CANAL LA VILLETTE

O canal La Villette (Paris, França) (Figura 2) é uma área de baixo fluxo de água, que tem uma atividade de navegação e um lugar no qual permanece disponível para nadar durante o verão. A montante, o canal Ourcq é dividido em dois: o canal St Denis, onde existe uma eclusa para controlar o trânsito de barcos, e a bacia de La Villette, que é a área de estudo deste trabalho. A jusante, há uma empresa de bombeamento de água, principalmente para limpeza de ruas e o canal St Martin.



Figura 2 - Localização do canal na área de Paris

3.1.1 GEOMETRIA E HIDROLOGIA

A montante do canal La Villette, o canal Ourcq é dividido em dois ramos. Um forma o canal de Saint Denis e o outro flui para o canal de La Villette. A jusante, a bacia de La Villette se estende até o canal de Saint Martin. Além disso, uma estação de bombeamento de água deriva parte do fluxo para a rede de água não potável de Paris (Figura 3). A parte a montante do canal La Villette tem 25m de largura e 800m de comprimento. Em seguida, amplia e forma a bacia La Villette (largura 75m; comprimento 700m). O canal e a bacia de La Villette têm uma extensão total de 1,5 km e uma profundidade de aproximadamente 3 m. A média anual do fluxo de água é de aproximadamente $2,7\text{m}^3/\text{s}$.

- Radiação solar;
- Velocidade do vento;
- Nebulosidade;
- Evaporação.

Nesta simulação esta informação foi medida na estação de Météo-France do aeroporto de Orly.

3.2.2 HIDROLOGIA

Assim como o clima, a hidrologia é um fator que influencia a condição do canal, portanto os dados de entrada do fluxo devem ter:

- temperatura do fluxo;
- vazão;
- Nível de água.

A temperatura da água do fluxo é estimada pelo o Lago Champs, Champs-sur-Marne, Paris. Com relação à vazão, ela é calculada indiretamente pela soma da quantidade de água do canal de St. Martin e da água do controle da atividade do barco devido aos armários no canal St. Denis, de acordo com os dados de Marie de Paris. Mas o nível de água na saída é considerado constante, devido ao vertedouro da estação de água.

3.3 FONTE DE CONTAMINAÇÃO

Nesta área de estudo limitada, a poluição potencial está ligada ao escoamento superficial na área urbana próxima, o que pode levar à poluição relacionada ao dejetos canino. Alternativamente, a poluição do canal também pode vir de: excrementos de pássaros, barcos, ressurgimento por sedimentos, contaminações humanas.

Mas de acordo com o Relatório da prefeitura de Paris(Rapport de fase 1: Etatdeslieux, 2017), as fontes potenciais de poluição podem ser separadas como:

- Precipitação: escoamento de águas pluviais urbanas e transbordamentos de esgotos combinados (tempestades de vertedouros podem descarregar águas mistas: águas pluviais e águas residuais);
- Águas residuais provenientes de más ligações (águas residuais descarregadas na rede de águas pluviais) que dependem apenas do número de edifícios mal conectados;
- Barcos não equipados com tanques de coleta de esgoto ou com gerenciamento potencialmente ruim desses tanques.

Na área de banho, uma rotina de medição leva amostras de água diariamente ao laboratório com um tempo de espera de 48 para os resultados. Mas um primeiro sistema de gestão ativa foi utilizado em 2017 e 2018 na entrada do canal (Figura 4), é o dispositivo de alerta diário de desenvolvimento de algas (clorofila a) denominado ALGAERorch, BBE Moldaenke, comercializado pela empresa Bionef. Assim, pode antecipar o monitoramento do padrão da água na área de banho, já que há tempo de espera para o resultado.



Figura 4 - Ponto de medição da área

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo utilizado é o Telemac3D (v7.2), módulo hidrodinâmico 3D do sistema TELEMAC-MASCARET (Desombre et al., 2016). É uma poderosa ferramenta de modelagem integrada para fluxos de superfície livre, usada em muitos estudos em todo o mundo (por exemplo, Kopmann e Markofsky, 2000). Para processamento de dados de entrada e visualização de resultados, foi utilizado o software Blue Kenue (v3.3).

4.1 PARÂMETROS DE MODELAGEM

TELEMAC-3D é um código computacional tridimensional que descreve o campo de velocidade 3D (U , V , W) e a profundidade da água h (e, a partir da profundidade inferior, a superfície livre S) em cada intervalo de tempo. Além disso, resolve o transporte de vários traçadores que podem ser agrupados em duas categorias, a saber, os chamados traçadores “ativos” (principalmente temperatura), que alteram a densidade da água e atuam no fluxo através da gravidade, e os chamados traçadores “passivos” que não afetam o fluxo e são meramente transportados.

4.1.1 EQUAÇÕES

O principal cálculo hidrodinâmico feito no TELEMAC-3D usa equações tridimensionais de Navier-Stokes com uma superfície livre variando no tempo, como:

- Variação indiscutível de densidade na equação de conservação de massa (fluido incompressível);
- Hipótese da pressão hidrostática (essa hipótese resulta em que a pressão a uma dada profundidade é a soma da pressão do ar na superfície do fluido mais o peso do corpo d'água sobrejacente);

- Aproximação de Boinesq para o momento (as variações de densidade são consideradas apenas como forças de flutuação).

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + v \Delta(U) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + v \Delta(V) + F_y \quad (3)$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 \partial \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz' \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \text{div}(v \text{grad} T) + Q \quad (5)$$

Onde os termos são:

h (m) - profundidade da água,

Z_s (m) - elevação da superfície livre,

U, V, W (m/s) - componentes tridimensionais da velocidade,

T (°C, g/l ...) - marcador passivo ou ativo (atuante na densidade),

p (X) - pressão,

p_{atm} (X) - pressão atmosférica,

g (m/s²) - aceleração gravitacional

v (m²/s) - velocidade cinemática ou coeficiente de difusão do marcador,

Z_f (m) - profundidade do fundo

ρ_0 (X) - densidade referente,

$\Delta \rho$ (X) - variação da densidade em torno da variação referente,

t (s) - tempo,

x, y (m) - componente espacial horizontal,

z (m) - componente espacial vertical,

F_x, F_y (m/s²) - termos da fonte,

Q (unidade do marcador) - diminuição do marcador na fonte,

h, U, V, W e T são variáveis computacionais com quantidades desconhecidas.

O traçador pode ser ativo (afeta a hidrodinâmica) ou passivo no TELEMAC-3D. Temperatura, salinidade e, em alguns casos, um sedimento são traçadores ativos. A equação da evolução do traçador é formulada é

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

Onde os termos são:

T (unidade do marcador) - marcador passivo ou modificador de densidade,

v_t (m²/s) - coeficiente de difusão do marcador,

x, y, z (m) - componente espaciais,

Q (unidade do marcador) - diminuição do marcador na fonte.

4.1.2 FUNDO

Para uma primeira análise, as simulações foram feitas com uma batimetria simplificada, considerada como fundo quadrado. Após uma medição em 11 de dezembro de 2018, a forma do fundo foi estimada com mais precisão. Cinco perfis da seção (Figura 5) foram medidos com um ecobatímetro (798ci HD SI Combo) equipado com sonar 700 Series™, responsável por medir a profundidade da água. As medições foram feitas a cada 2 metros, com a ajuda de uma corda marcada, e um barco para seguir lentamente em frente.



Figura 5 - Seção de medição da batimetria

Também em relação ao fundo, o coeficiente de atrito também deve ser atribuído ao canal. Existem várias formas de equacionar a interação desse atrito da água com a interface, no Telemac3D, o coeficiente de rugosidade (Figura 6) pode ser representado por 5 leis notáveis no meio de hidrologia, ou o caso de atrito nulo. O valor padrão adotado pelo o Telemac3D é 60, e no trabalho foi usado a lei de Manning.

BOTTOM FRICTION

The friction law used for the bottom friction modelling is set by the keyword *LAW OF BOTTOM FRICTION* which can assume the following values:

- 0: No friction,
- 1: Haaland law,
- 2: Chézy law (default value),
- 3: Strickler law,
- 4: Manning law,
- 5: Nikuradse law.

As regards the 1-5 values, the value of the friction coefficient corresponds to the selected law, and shall be given by means of the keyword *FRICTION COEFFICIENT FOR THE BOTTOM*. Obviously, that only holds true if the friction is constant in both space and time. The default value for that parameter is 60.

Figura 6- Manual da Telemac (FRICÇÃO DE FUNDO)

4.1.3 MALHA (GEOMETRY FILE)

A grade de malha computacional (Figura 7) é composta por triângulos horizontais de 4m de lado e 10 camadas de 0,30m de altura. Na junção entre o canal e a bacia de La Villette, a malha é mais fina, com triângulos de 2m de lado, porque é uma zona onde é necessária uma melhor análise computacional devido a um fluxo perturbado.

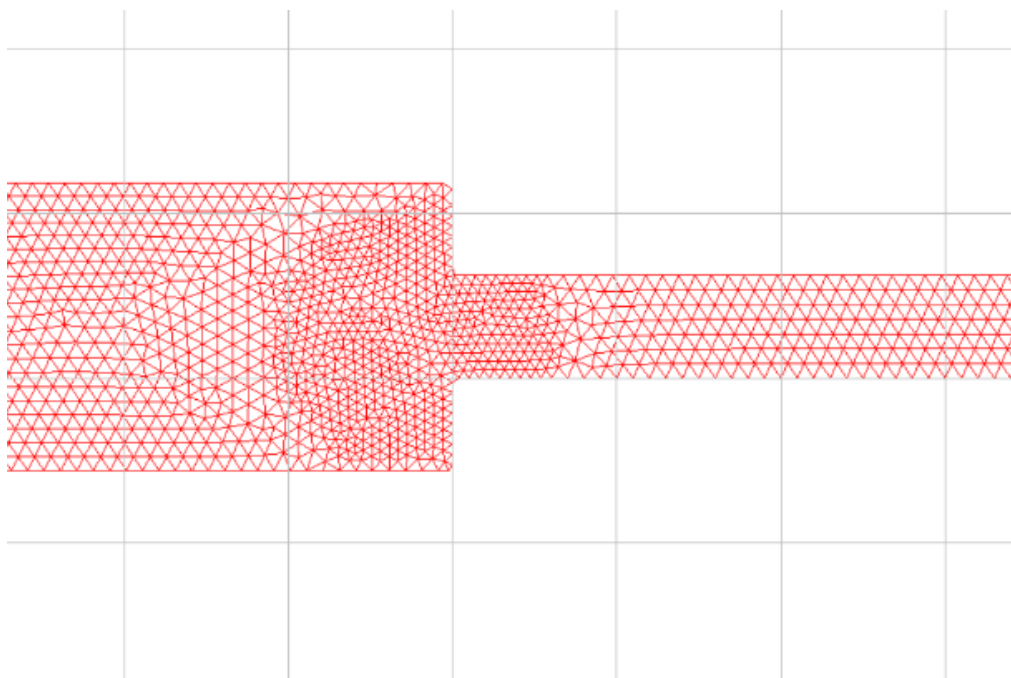


Figura 7 - Configuração da malha do Villette

4.1.4 CONFIGURAÇÃO A MONTANTE E A JUSANTE (BOUNDARY CONDITIONS FILES)

Na condição de contorno, os terminais são selecionados (Figura 8 e os pontos laterais do canal não têm informações de condição de fluxo. No caso do canal La Villette, a entrada tem uma taxa de fluxo bem definida, enquanto a saída tem um nível de água bem definido por causa do vertedouro de bombeamento de tratamento de água.

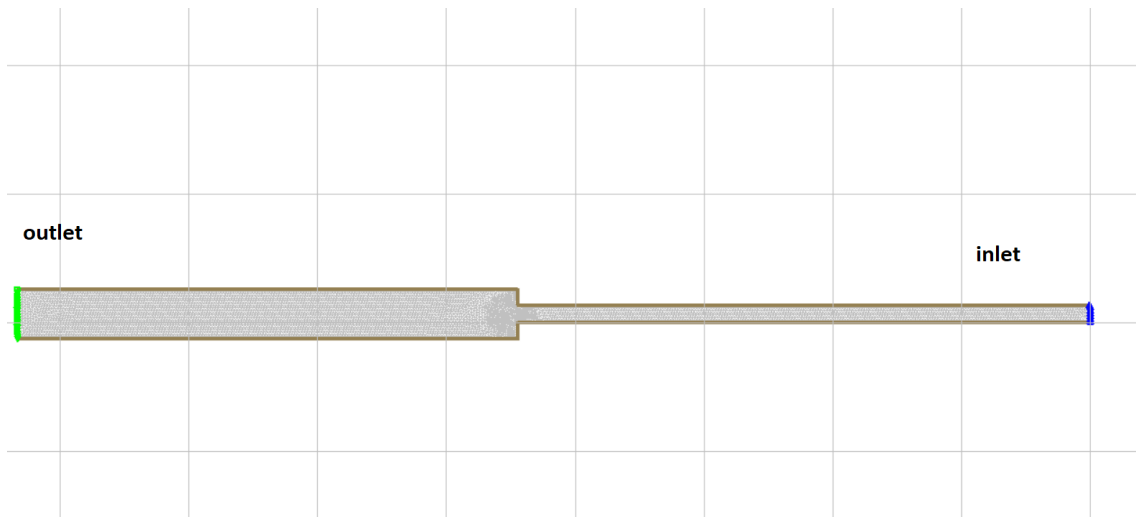


Figura 8 - Arquivo de Boundary Conditions

5. RESULTADOS

5.1 TROCA DE CALOR

A primeira análise (Figura 9) foi feita para observar unicamente o efeito da troca de calor do copo d'água com a atmosfera, assim, os valores de velocidade e de vazão são nulos, se comportando semelhante como a um lago, onde não há a entrada ou saída de volume d'água. E também buscou-se identificar a influência da batimetria nesse comportamento. Para executar uma simulação no Telemac3D, a modelagem deve ter as informações iniciais de:

- velocidade escalar (0 m/s)
- Fluxo de entrada (0 m³/s)
- Inferior (Natural e Simplificado)
- Superfície (o canal está cheio de água a 52.0 mNGF)
- Temperatura (condição inicial 20 °C)

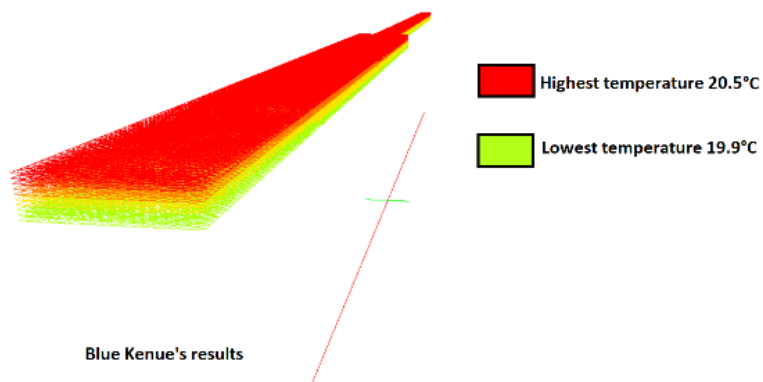
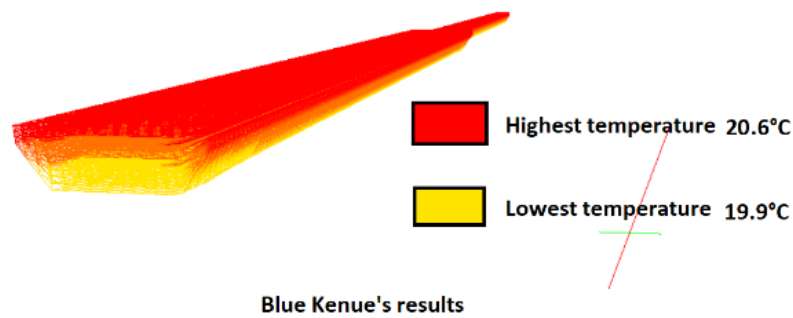


Figura 9 - Troca de calor (sem fluxo) com uma forma natural (cima) e uma forma quadrada (baixo)

O resultado dessa primeira simulação (Figura 10 e Figura 11) mostra que a temperatura do fundo do canal varia mais que a do topo, o que era de se espera, já que essa esta mais perto da atmosfera. E se comparando entre os dois tipos de geometria de fundo, percebe-se que os valores de temperatura da água no fundo do canal, não é influenciada tanto quanto a do topo, no período onde há elevação da temperatura, pois ocorre o fenômeno de estratificação da temperatura em camadas, o que não acontece no caso do resfriamento, onde o canal se resfria uniformemente.

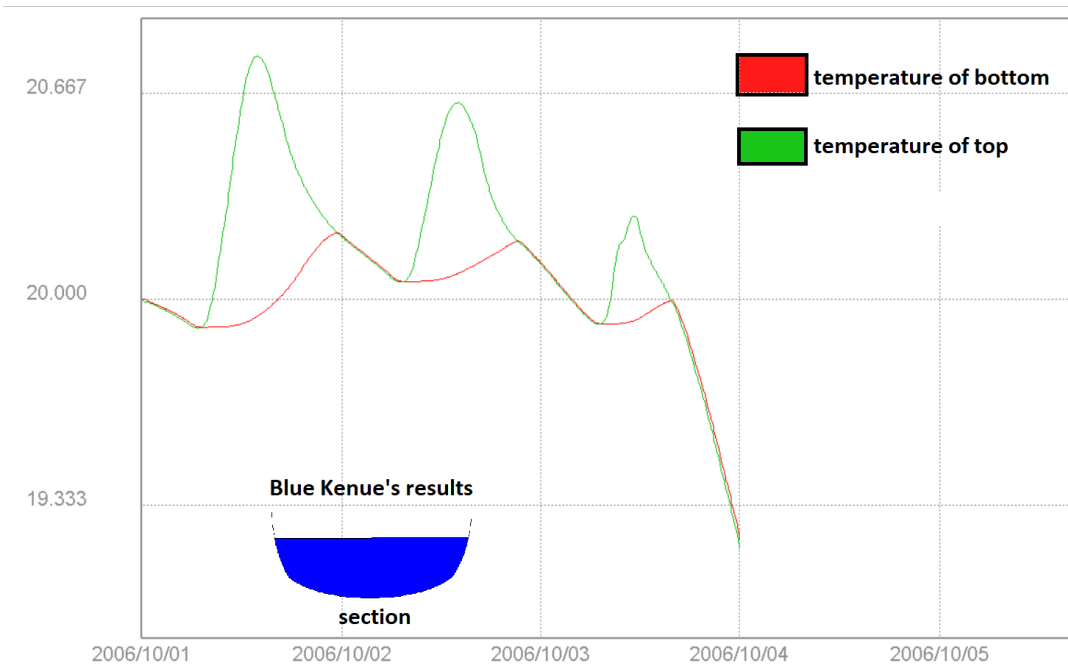


Figura 10 - Gráfico de temperatura (Natural)

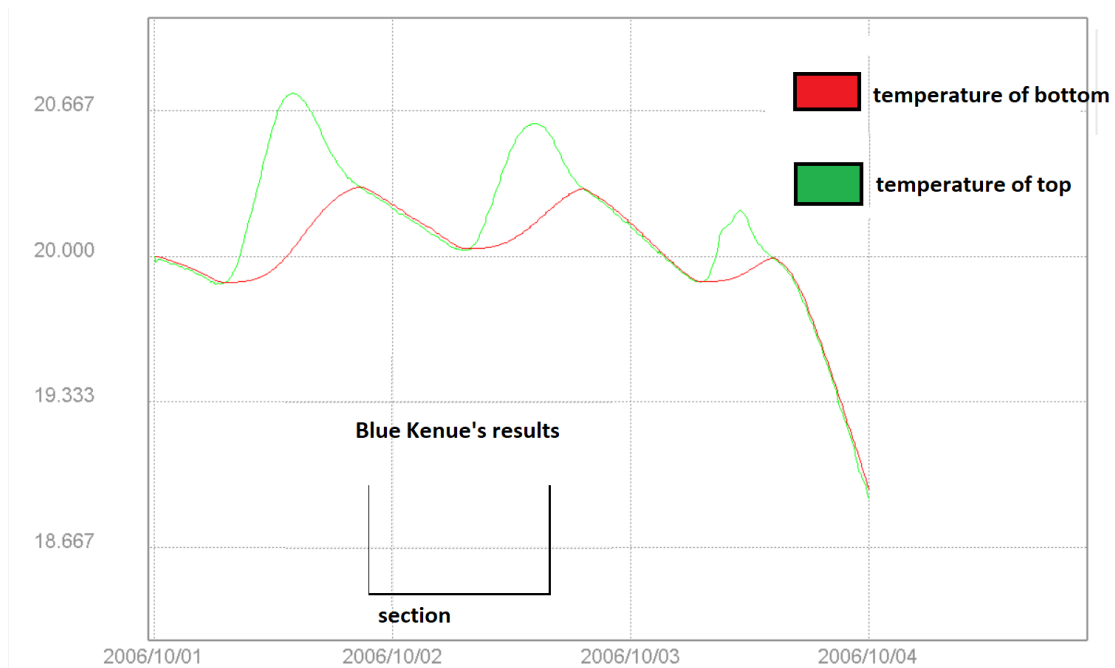


Figura 11 - Gráfico de temperatura (quadrado)

5.2 VELOCIDADE 2D

Agora o canal tem um fluxo com $2,7\text{m}^3/\text{s}$ de vazão, mas a temperatura não foi calculada. Ao analisar (Figura 12) os dois perfis de velocidade, a seção natural mostra maior velocidade em todo o canal, pois há alguma diminuição da área.

Por outro lado, a variação de velocidade acima do canal é mais suave ao longo da seção natural, em comparação com a velocidade ao longo da seção quadrada.

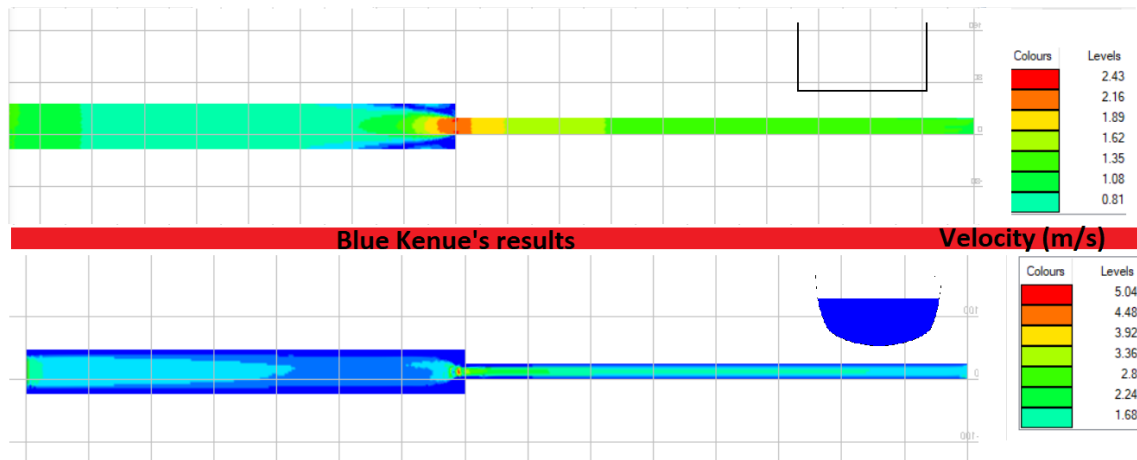


Figura 12 - Perfis de velocidade 2D

No entanto, a velocidade é maior que a esperada, então alguns parâmetros foram alterados para recalibrar esses valores.

Depois disso, outras simulações (Figura 13) foram feitas para ver o valor mais realista do coeficiente de rugosidade.

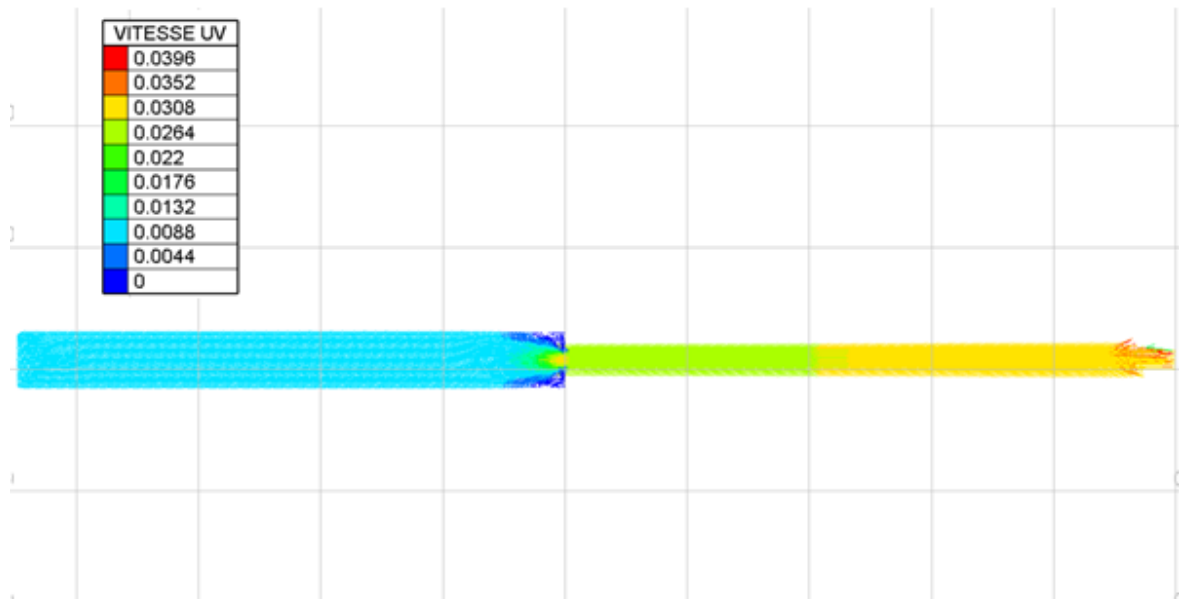


Figura 13 - Simulação com correção de coeficiente de rugosidade

Na primeira simulação, foi utilizado o modelo de atrito de lotação com o valor de 0,1, mas a sensibilidade a esta lei não se apresentou significativa. Então, foi usada a lei Strickler com o valor de 60 (padrão).

5.3 VELOCIDADE 3D

A simulação da velocidade 3D (Figura 14) não é realista porque a velocidade inicial do fluxo é zero, portanto, após o fluxo ser normal. Mas pode-se colocar uma fonte pontual (Figura 15) no início do canal com uma vazão de 2,7 m³/s, e os resultados não são diferentes da simulação 2D.

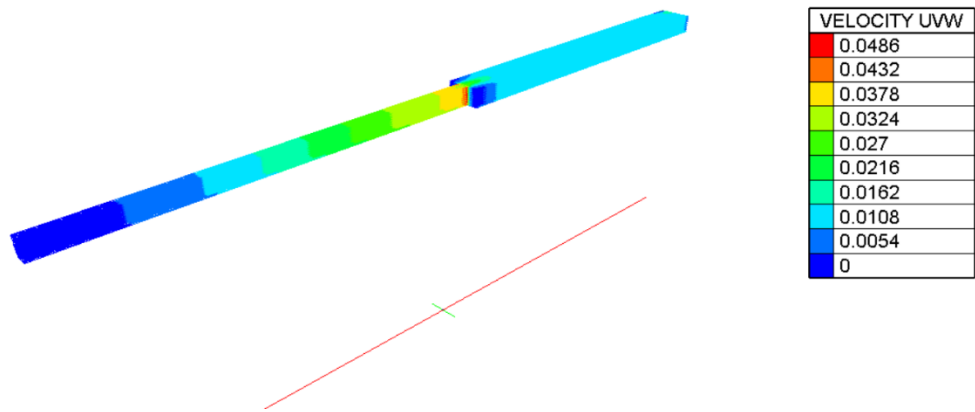


Figura 14 - Velocidade 3D (velocidade inicial zero)

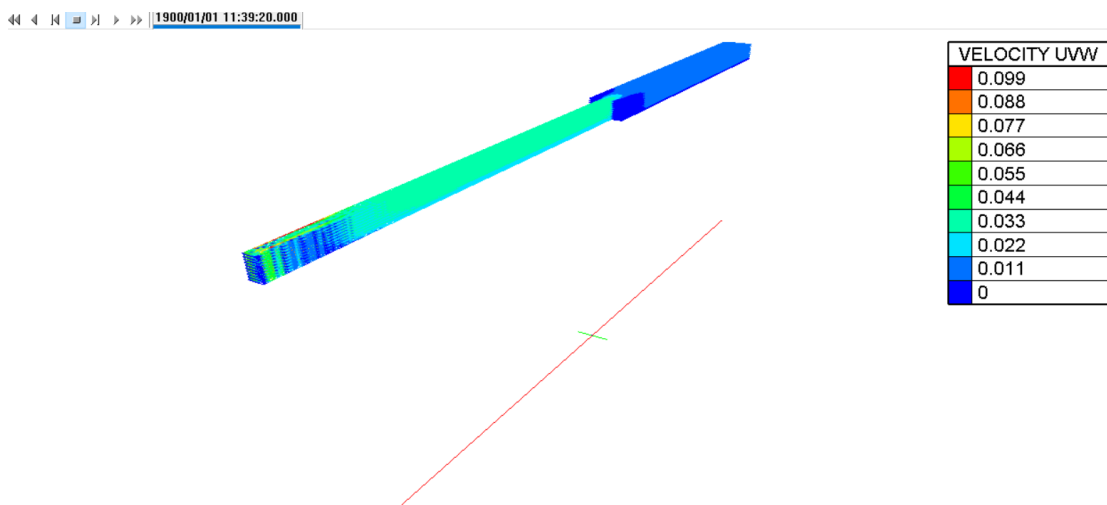


Figura 15 - Velocidade 3D (fonte pontual)

Uma das razões para fazer uma simulação 2D é que ela será usada para inserir a condição inicial da simulação 3D. Um problema observado nos casos com vazão foi que houve uma oscilação do sistema, principalmente da altura da água.

O nível de saída de água, se constante no momento, fixado em 52m de nível, mas a variação de entrada no momento, e oscilar (Figura 16). Assim, a simulação 2D é importante para introduzir uma boa condição inicial para executar o caso 3D, porque, caso contrário, o nível da água também oscilaria, e os resultados seriam diferentes. Outra vantagem é que o tempo para simular no caso 2D é muito menor do que no caso 3D.

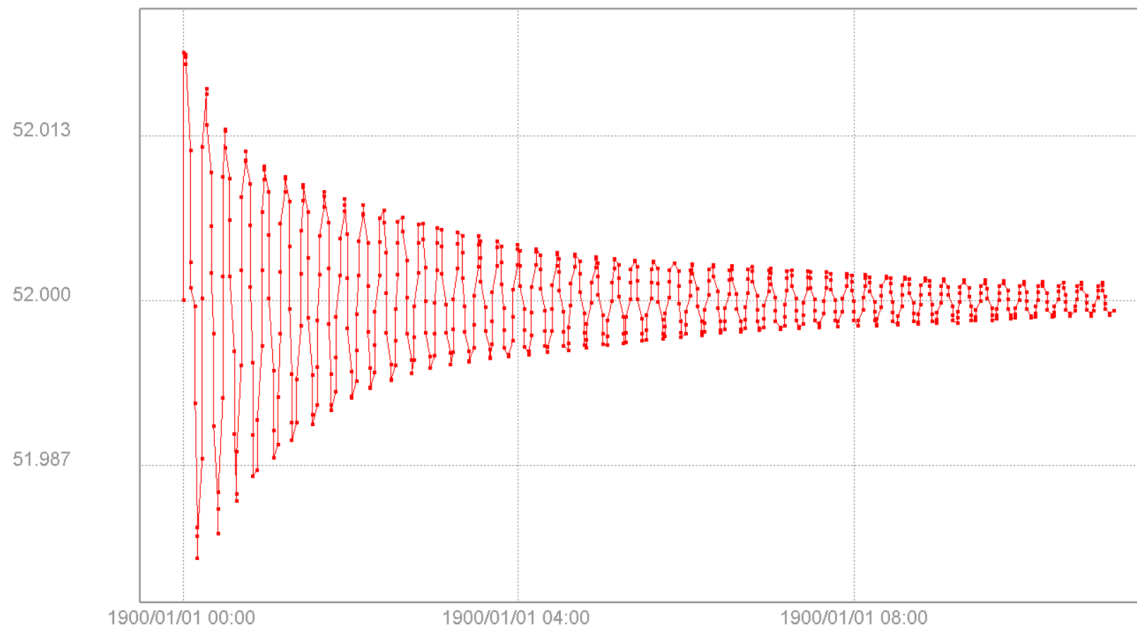


Figura 16 - Variação do nível de água de entrada (caso 2D)

5.4 VELOCIDADE 3D E TROCA DE CALOR

Para introduzir a temperatura no fluxo, é necessário especificar essa informação na condição limite (Tabela 2), como a profundidade da água e a taxa de fluxo.

Tabela 2- Condições de contorno nos pontos de saída e de entrada

LIHBOR	LIUBOR	LIVBOR	LITBOR	
2	2	2	2	<i>Parede maciça</i>
2	0	2	2	<i>Parede maciça com zero U</i>
2	2	0	2	<i>Parede maciça com zero V</i>
2	0	0	2	<i>Parede maciça com zero U e V</i>
4	4	4	4	<i>H, T e velocidade indefinidas</i>
5	4	4	4	<i>H definido, T e velocidade indefinido</i>
5	4	0	4	<i>H definido, T e U indefinido, com zero V</i>
5	0	4	4	<i>H definido, T e V indefinido, com zero U</i>
1	1	1	4	<i>Onda incidente e marcador indefinido</i>
4	5	5	5	<i>Q e T definido e H indefinido</i>
4	5	0	5	<i>Q e T definido com zero V, e H indefinido</i>
4	0	5	5	<i>Q e T definido com zero U, e H indefinido</i>
4	6	6	5	<i>Velocidades e T definidos e H indefinido</i>
5	5	5	5	<i>H, Q e T definidos</i>
5	6	6	5	<i>H, velocidades e T definidos</i>

Então, no FORTRAN FILE (t3d_heat_exchange.f) existe uma sub-rotina que faz uma transformação no tamanho da malha, por isso é necessário colocar “!” Para comentar as linhas no programa, para estar no tamanho real.

Na simulação pré-formada em 31/10/2018 (Figura 17 e Figura 18), o fluxo chega com 2,7 m³/s e 20,1 °C, e a saída é com um nível constante de água de 52 m.

Inicialmente, a velocidade é a mesma que a última simulação 2D com uma temperatura de 20 °C.

A troca de calor é atribuída com uma atmosfera padrão que está localizada no caso da validação do Telemac3D.

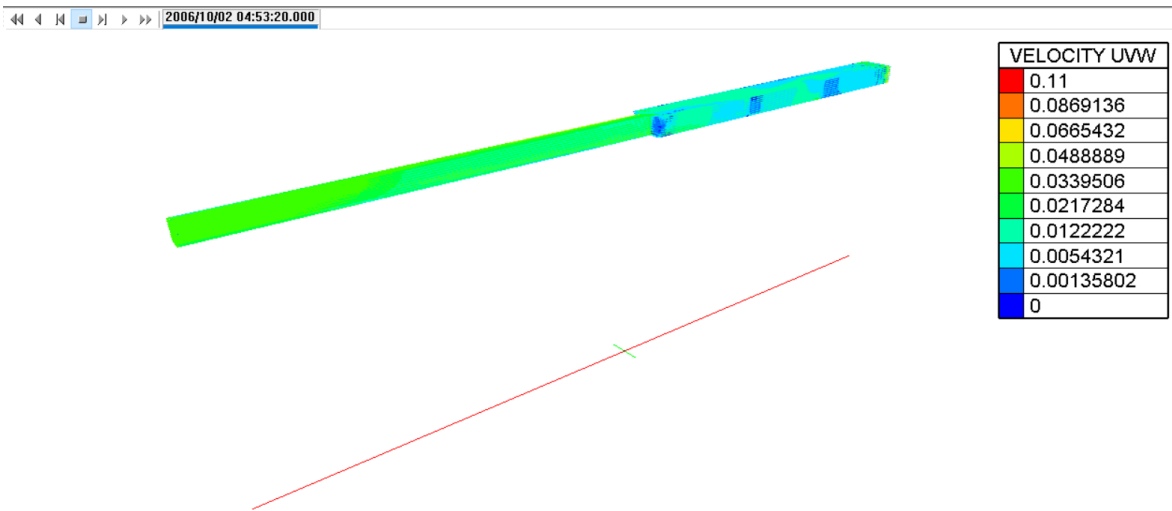


Figura 17 - Velocidade 3D (troca de calor + taxa de fluxo)

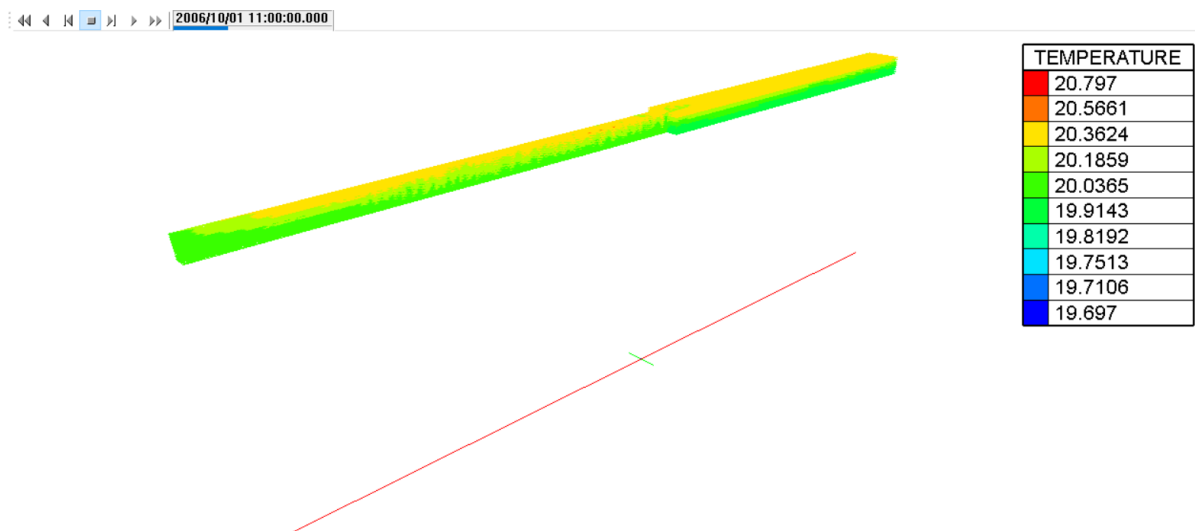


Figura 18 - Temperatura (troca de calor + fluxo)

A oscilação (Figura 19) do nível da água no início do canal é semelhante ao caso 2D, mas inferior a 1 mm.

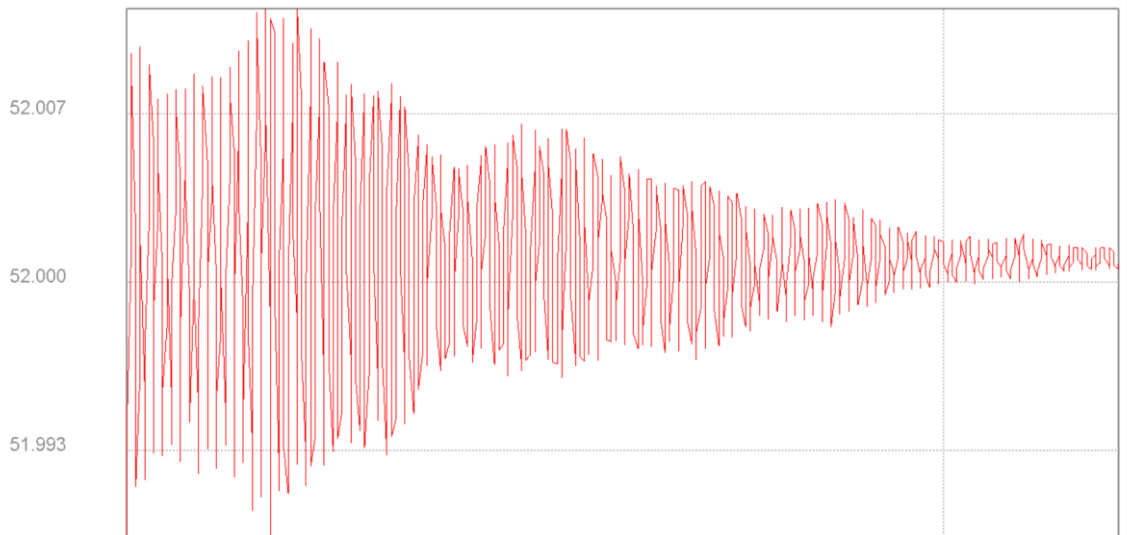


Figura 19 - Variação do nível de água de entrada (caso 3D)

5.5 MEDIÇÃO DE CAMPO DA VELOCIDADE

Para verificar a verossimilidade do modelo em relação a hidrodinâmica real do canal é feito um experimento de campo no sistema de canal La Villette para verificar o modelo no Telemac3D. Dessa forma com o auxílio de garrafas equipadas com GPS (Figura 20) foi monitorado a posição versus o tempo das garrafas para inferir a velocidade da superfície ao longo do canal. 3 garrafas foram lançadas em 11/12/2018 em 2 pontos diferentes (Figura 21):



Figura 20 - Garrafa com GPS(esquerda) e local de lançamento (direita)

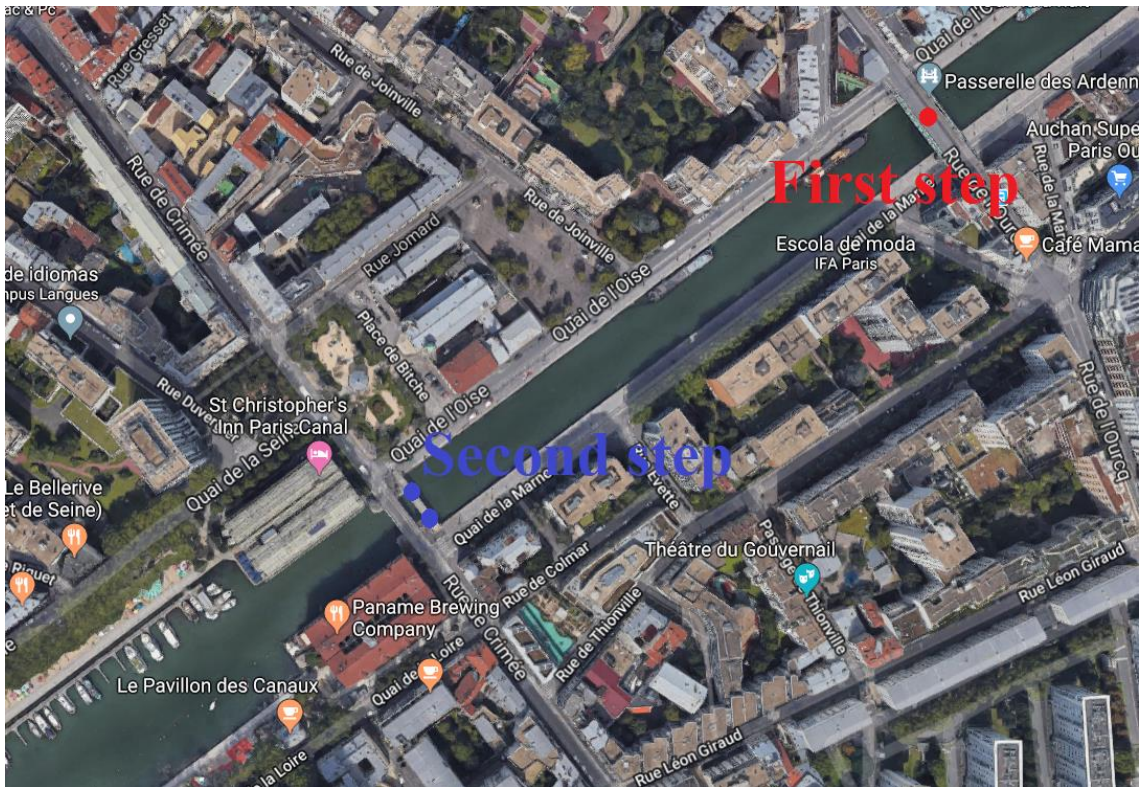


Figura 21 - Locais da lançamentos separadaos em 2 passos

O começo do experimento foi dividido em dois passos. O primeiro passo (ponto vermelho) com 1 garrafa foi lançada às 9:30. E o segundo passo (pontos azuis) onde foram lançadas 2 garrafas, uma às 9:35 e outra às 9:45.

Após uma hora, as duas garrafas do segundo degrau ficaram presas na margem direita em um barco. A garrafa lançada no primeiro passo realizou um caminho reto, parando apenas na margem esquerda no final do canal (Figura 22).



Figura 22 - Ponto de captação

Então, apenas a primeira garrafa obteve boas medidas da posição (Figura 23). Cada posição é registrada com o tempo. Dessa forma, é possível calcular a velocidade dividindo a distância entre dois locais pelo tempo.

A incerteza na posição do GPS é de 10m. Portanto, quanto mais longo o caminho, mais precisa é a velocidade. O caminho total é dividido em três segmentos:

$$v = \frac{\text{distancia(m)}}{\text{tempo(s)}} \quad (7)$$

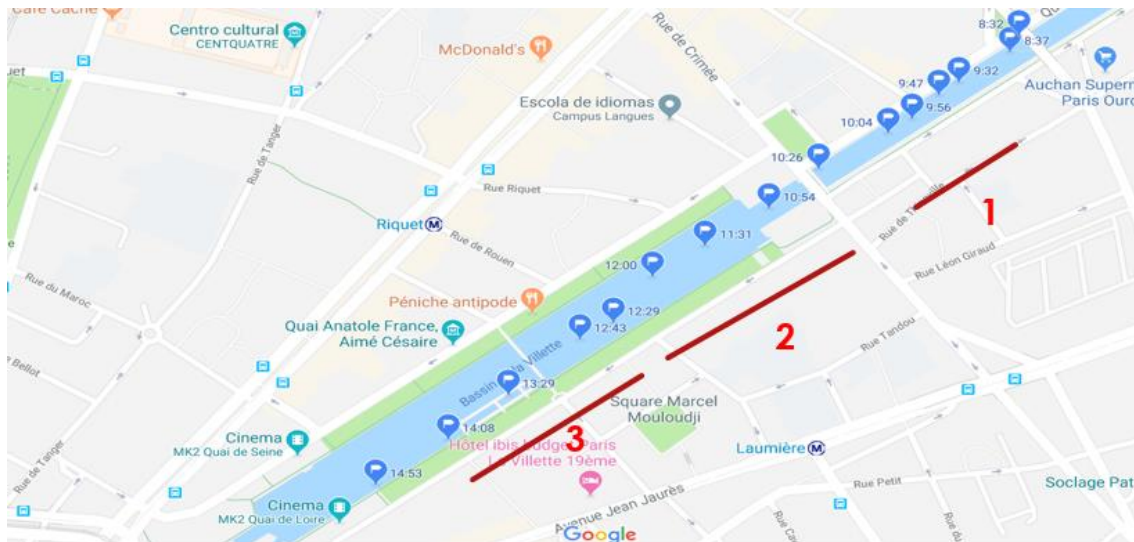


Figura 23 - Medições durante o tempo do GPS

- Primeiro caminho:

De acordo com a simulação da Telemac3D e aproximação de $v = Q / A$, a velocidade esperada é de 0,034m/s

Esse caminho começou às 8:37 e terminou às 10:04 (87 min), com uma distância de 177m. Portanto, a velocidade é em torno de 0,034m/s \pm 0,0019m/s.

- Segundo caminho (caminho de transição):

De acordo com a simulação da Telemac3D, a velocidade esperada é de 0,040m/s

Este caminho começou às 10:26 e terminou às 11:31 (65 min), com uma distância de 165m. Portanto, a velocidade é de cerca de 0,042m/s \pm 0,0025m/s.

- Terceiro caminho:

De acordo com a simulação da Telemac3D e a aproximação de $v = Q / A$, a velocidade esperada é de 0,014 m/s

Esse caminho começou às 12:00 e terminou às 14:08 (128 min), com uma distância de 320m. Portanto, a velocidade é de cerca de 0,0416m/s \pm 0,0013m/s.

Assim, a velocidade do primeiro caminho e o segundo caminho de transição são consistentes com o esperado (Tabela 3), mas o terceiro caminho tem uma velocidade maior do que a esperada, em torno de 0,014 m/s. Talvez essa diferença possa ser explicada devido a um vento mais forte neste trecho do canal ou à atividade de pequeno barco naquela área. No dia do experimento, havia um treinamento de caiaque, então talvez as ondas pudessem ter movido as garrafas mais rápido.

Tabela 3– Velocidade do modelo e do experimento

Caminho	Modelo	Experimento
1	3,4cm/s	3,4cm/s
2	4,0cm/s	4,2cm/s
3	1,4cm/s	4,2cm/s

5.5 SIMULAÇÃO FINAL

O objetivo da simulação final é validar a parte hidrodinâmica do modelo já previamente calibrado através de uma medição de campo da velocidade da água. E acoplado a isso uma simulação do tempo de transferência do ponto de medição até a área de banho com valores reais.

A evolução temporal da velocidade da água na superfície da zona balnear, durante o período de simulação de 21 a 27 de julho de 2017, é apresentada na (Figura 24). Flutua cerca de 2 cm/s com um valor máximo de 3,3 cm/s. A distribuição da velocidade no sistema, canal e bacia de La Villette, no final da simulação, é apresentada na. Como esperado, as velocidades são maiores no canal de La Villette e mais altas na camada superficial do que no fundo.

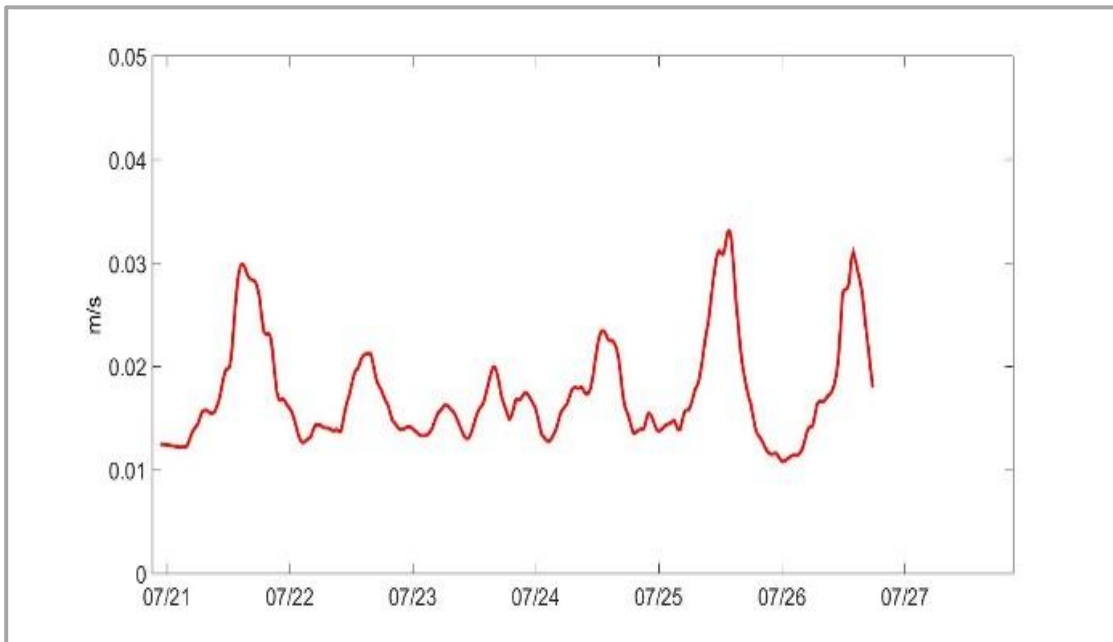


Figura 24 - Velocidade da água na superfície

As velocidades simuladas estão dentro da faixa das velocidades estimadas qualitativamente no experimento de medição em campo.

A temperatura da água foi simulada usando a sub-rotina de troca de calor. A temperatura da água superficial simulada mostra ciclos e uma tendência decrescente ao longo do período simulado, atingindo 21,7 °C no dia 27 de julho (Figura 25).

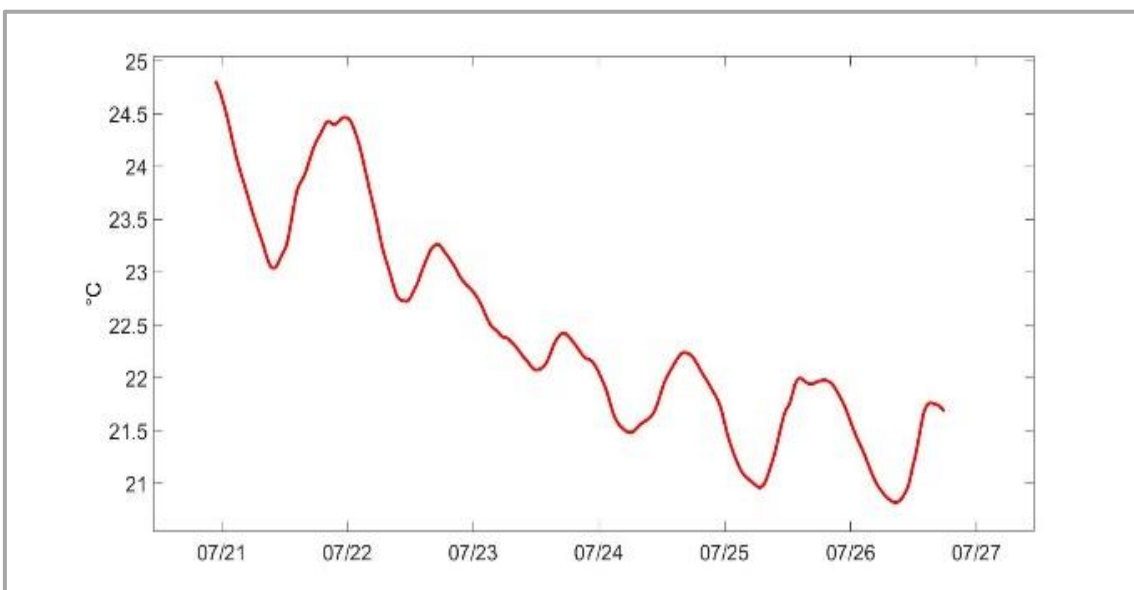


Figura 25 – Temperatura da superfície da água

Durante o período simulado, o canal e a bacia de La Villette apresentaram uma estratificação térmica, com uma diferença de cerca de 0,5 °C entre a superfície e o fundo. O transporte de *E. coli* foi simulado considerando-o como um traçador passivo. Nenhuma taxa de decaimento foi usada. Em relação à concentração inicial de *E. coli* foi assumido nulo. Na estação de amostragem a montante, uma concentração de 15 MPN/100 ml foi medida em 21 de julho e uma concentração de 30 MPN/100 ml em 25 de julho. Estes dados foram utilizados como entrada para o modelo, a fim de calcular o tempo de transferência entre a observação de tal nível no local de amostragem e a sua observação no local do banho. Os resultados da simulação mostram que a contaminação microbiológica leva, no dia 21 de julho, 10 horas e 30 minutos a fluir da estação de amostragem a montante para a área balnear e no dia 25 de julho, 8 horas e 21 minutos (Figura 26).

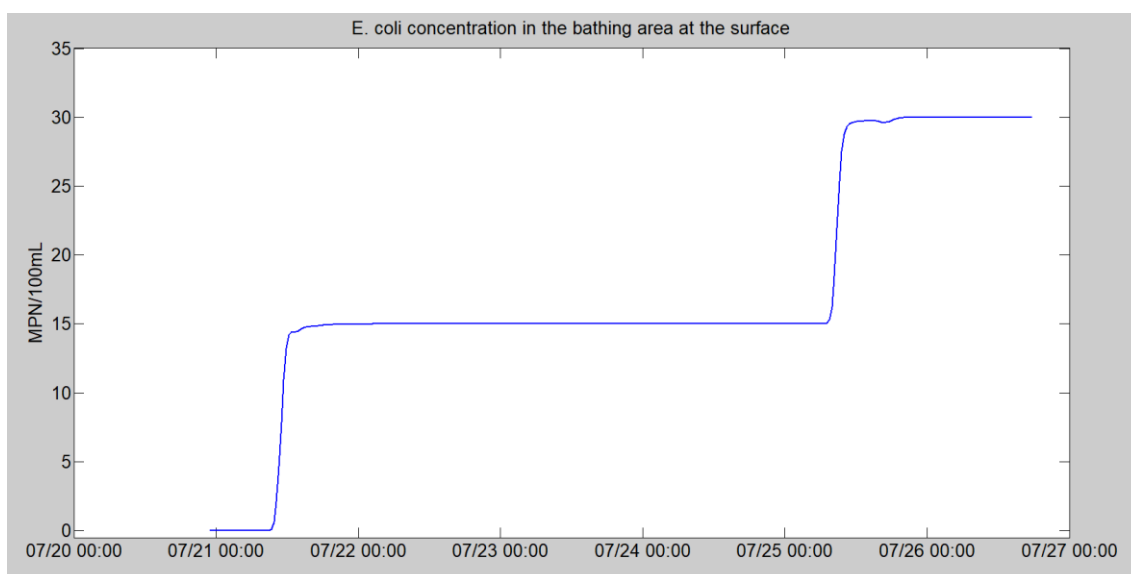


Figura 26 - Concentração de *E. coli*

6.CONCLUSÃO

A dispersão de poluentes no meio hidrológico é regida por vários parâmetros, e cabe o autor da modelagem fazer as suposições necessárias para que esse tipo de cálculo seja feito de forma coerente, ou seja, analisar as variáveis mais sensíveis a esse problema e implementar as correções necessárias para que os resultados se torne mais verossímil. Dessa forma, a modelagem apresentada

acima pode ser facilmente adaptada para dispersão de outros poluentes, biológicos ou não no canal, bastando apenas a adaptação de parâmetros que influenciem esse tipo de contagiante.

O objetivo final do trabalho foi encontrar o tempo de transporte do *E. coli* ao longo do canal, e assim conseguindo uma faixa de reação das autoridades para a interdição do contato humano na água para a recreação. E o valor encontrado induz que os valores que atualmente são usados como estimativa (12 horas), são na verdade superiores do que foi calculado no Telemac3D (pior caso: 8 horas e 21 minutos), e, portanto, as medidas que são planejadas atualmente são de certa forma ineficazes segundo esses resultados. Portanto fica-se um alerta para os casos de fortes chuvas, e dias quentes, pois segundo o que foi calculado, é o pior caso para os agentes patológicos.

Em relação as possíveis modificações no modelo, propõe-se que na parte geométrica do canal seja incluso a parte de monte do canal que se inicia com a separação do canal de La Villette com o canal St. Dennis, que apresenta uma grande variação de fluxo devido às eclusas para a navegação. E, por fim, a proposição de um sistema integrado dos canais a montante até o ponto que o tempo de transporte até a área de banho seja igual ao período de meia vida dos micro-organismo dos patogênicos *E. coli*, parâmetro já usado pela a Prefeitura de Paris (Rapport de phase 1 : Etat des lieux, 2017). Em relação a interação do *E. coli*, a subrotina de decaimento pode ser implementada de forma que o Telemac3D calcule a degradação e o surgimento do microorganismo de acordo com os parâmetros de temperatura, incidência de raios solares, e até mesmo a concentração de oxigenio. Já em relação à coleta de dados de meteorologia e hidrologia, é possível a implementação de estações de monitoramento.

7. BIBLIOGRAFIA

Cha, Y., Park, M.-H., Lee, S.-H., Kim, J.H., Cho, K.H., 2016. Modeling spatiotemporal bacterial variability with meteorological and watershed land-use characteristics. *Water Res.* 100, 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.024>

Chen, W.-B., Liu, W.-C., 2017. Investigating the fate and transport of fecal coliform contamination in a tidal estuarine system using a three-dimensional model. *Mar. Pollut. Bull.* 116, 365–384. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.031>

Cho, K.H., Pachepsky, Y.A., Oliver, D.M., Muirhead, R.W., Park, Y., Quilliam, R.S., Shelton, D.R., 2016. Modeling fate and transport of fecally-derived microorganisms at the watershed scale: State of the science and future opportunities. *Water Res.* 100, 38–56. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.064>

Coffey, R., Cummins, E., Bhreathnach, N., Flaherty, V.O., Cormican, M., 2010. Development of a pathogen transport model for Irish catchments using SWAT. *Agric. Water Manag.* 97, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.017>

Domingues, V. O., Tavares, G. D., Stüker, F., Michelot, T. M., Reetz, L. G. B., Bertoncheli, C. M., Hörner, R. 2007. Contagem de bactérias heterotróficas na água para consumo humano: Comparação entre duas metodologias. *Saúde.* 33(1): 15-19,

Dorner, S.M., Anderson, W.B., Slawson, R.M., Kouwen, N., Huck, P.M., 2006. Hydrologic Modeling of Pathogen Fate and Transport. *Environ. Sci. Technol.* 40, 4746–4753. <https://doi.org/10.1021/es060426z>

Hellweger, F.L., Masopust, P., 2008. Investigating the Fate and Transport of *Escherichia coli* in the Charles River, Boston, Using High-Resolution Observation and Modeling. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 44, 509–522. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00179.x>

Hintaran, A.D., Kliffen, S.J., Lodder, W., Pijnacker, R., Brandwagt, D., van der Bij, A.K., Siedenburg, E., Sonder, G.J.B., Fanoy, E.B., Joosten, R.E., 2018. Infection risks of city canal swimming events in the Netherlands in 2016. *PLOS ONE* 13, e0200616.

Islam, M.M.M., Sokolova, E., Hofstra, N., 2018. Modelling of river faecal indicator bacteria dynamics as a basis for faecal contamination reduction. *J. Hydrol.* 563, 1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.077>

Jonathan DESOMBRE, Chi-Tuân PHAM, Cédric GOEURY, Antoine JOLY, 2016. TELEMAC MODELLING SYSTEM.

Jovanovic, D., Henry, R., Deletic, A., McCARTHY, D., 2014. Modelling Impact of Stormwater on Faecal Contamination of Urban Estuaries 10.

Kopmann, R., Markofsky, M., 2000. Three-dimensional water quality modelling with TELEMAC-3D. *Hydrological Processes* 14, 2279–2292.

Liu, L., Phanikumar, M.S., Molloy, S.L., Whitman, R.L., Shively, D.A., Nevers, M.B., Schwab, D.J., Rose, J.B., 2006. Modeling the transport and inactivation of *E. coli* and enterococci in the near-shore region of Lake Michigan. *Environ. Sci. Technol.* 40, 5022–5028.

Moulinec, C., Denis, C., Pham, C.-T., Rougé, D., Hervouet, J.-M., Razafindrakoto, E., Barber, R.W., Emerson, D.R., Gu, X.-J., 2011. TELEMAC: An efficient hydrodynamics suite for massively parallel architectures. *Comput. Fluids* 51, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.003>

Niazi, M., Obropta, C., Miskewitz, R., 2015. Pathogen transport and fate modeling in the Upper Salem River Watershed using SWAT model. *J. Environ. Manage.* 151, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.042>

Rapport de phase 1 : Etat des lieux, 2017. , Elaboration d'un profil de baignade pour une baignade publique sur le bassin de la Villette à Paris. Mairie de Paris.

Sales, M.E.S., and de Lacerda, M.C. 2017. Análise de coliformes totais e termotolerantes em água de poço de residências no município de Presidente Médici, Rondônia. 6, 10.